



PROJETO DE GRADUAÇÃO

METODOLOGIA NUMÉRICA DE OTIMIZAÇÃO DE DATA CENTERS POR ANÁLISE DE CFD

Por,
Paulo Cézar Pereira Corrêa

Brasília, 1 de Dezembro de 2014

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**METODOLOGIA NUMÉRICA DE OTIMIZAÇÃO
DE DATA CENTERS POR ANÁLISE DE CFD**

POR,

Paulo César Pereira Corrêa

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. João Manuel Dias Pimenta, UnB/ ENM
(Orientador)

Eng. Roberpaulo Eller, GrupoOrion
(Coorientador)

Prof. Taygoara Filamingo de Oliveira, UnB/ ENM

Prof. Walter Gennari Junior, UnB/ ENM

Brasília, 1 de Dezembro de 2014

Dedicatória

Aos meus pais, irmãos, família e amigos que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

Paulo César Pereira Corrêa

Agradecimentos

Agradeço à empresa GrupoOrion por ter me dado apoio e investimento em minha educação e carreira profissional, e à Universidade de Brasília por sua excelência no sistema de educação.

Paulo César Pereira Corrêa

RESUMO

Este presente trabalho visa mostrar uma aplicação prática dos conhecimentos de fluidodinâmica computacional (CFD) para a análise e otimização de sistemas de climatização em Data Centers convencionais. Passando pelos principais subsistemas de alimentação desses ambientes, o estudo elabora também uma metodologia de classificação e comparação quanto à Disponibilidade, Capacidade e Eficiência.

ABSTRACT

This present work aims to demonstrate a practical application of knowledge in Computational Fluid Dynamics (CFD) for the analysis and optimization of HVAC systems in conventional Data Centers. Looking through the main power subsystems of these environments, the study also develops a methodology of classification and comparison as to Availability, Capability and Efficiency.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	2
1.1 O TEMA EM ESTUDO E SUA RELEVÂNCIA	2
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
1.3 OBJETIVOS E METAS.....	6
1.4 METODOLOGIA.....	6
1.5 ESTRUTURA DO RELATÓRIO.....	7
2 REVISÃO TEÓRICA	8
2.1 DATA CENTERS	8
2.1.1 História.....	8
2.1.2 Tipos de Data Centers.....	9
2.1.3 Segurança.....	10
2.1.4 Normas.....	11
2.2 SALA COFRE.....	12
2.3 SISTEMAS EMBARCADOS	12
2.4 SISTEMA ELÉTRICO	13
2.5 SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO	15
2.5.1 Conceitos de Termodinâmica e o Ciclo Básico de Refrigeração.....	16
2.5.2 Expansão Direta x Expansão Indireta.....	17
2.6 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE AR	18
2.6.1 Disposição do Ambiente	19
2.6.2 Arquiteturas de Climatização.....	20
2.6.3 Sistemas Suplementares.....	22
2.6.4 Insuflamento Confinado	24
2.7 BOAS PRÁTICAS	25
2.8 FRAGMENTAÇÕES DE RECURSOS	27
3 ANÁLISE AMBIENTAL	28
3.1 CLASSIFICAÇÃO.....	28
3.1.1 Disponibilidade	28
3.1.2 Capacidade.....	28
3.1.3 Eficiência	29
3.2 FERRAMENTAS DE ANÁLISE	32
3.2.1 Métodos Numéricos.....	32
3.2.2 Modelagem Numérica.....	33
3.2.3 Estratégia de Aplicação.....	34
4 MODELO BASE	36
4.1 CASO TESTE	36
4.2 CASO REAL	37
4.3 MODELAGEM.....	38
4.3.1 Equipamentos de TI.....	38
4.3.2 Racks	40
4.3.3 Ar Condicionado.....	43
4.3.4 Quadros de Distribuição	45
4.3.5 Obstruções Abaixo do Piso	46
5 ESTUDO DE MALHA	49
5.1 CRIAÇÃO DA MALHA	49
5.1.1 Grau de Refinamento	50
5.1.2 Análise	51
6 MODELO FINAL	53
6.1 INSTRUMENTAÇÃO	53
6.1.1 Análise de Energia.....	53
6.1.2 Análise de Vazão	53
6.1.3 Análise de Temperatura	54
6.2 IMPLEMENTAÇÃO NO MODELO.....	57

7	RESULTADOS	59
7.1	RESULTADOS DO MODELO	59
7.1.1	Abaixo do Piso.....	59
7.1.2	Insuflamento.....	61
7.1.3	Campo de Temperatura	65
7.1.4	Racks	66
7.1.5	Análise de Cálculos	67
7.2	PROPOSTAS DE MELHORIA.....	69
7.2.1	Ventiladores dos Racks.....	70
7.2.2	Escovas nas Passagens de Cabos	71
7.2.3	Vedação Perimetral do Ar Condicionado.....	71
7.2.4	Rebalanceamento de Vazão Insuflada.....	72
7.2.5	Remanejamento dos Ativos de TI.....	72
7.2.6	Vedação dos Slots Vazios	73
7.2.7	Otimização dos Racks G8 e G10	73
7.2.8	Aumento dos Setpoints.....	73
7.2.9	Análise de Cálculos	74
7.3	CUSTO DAS MELHORIAS.....	75
7.4	ANÁLISE ECONÔMICA.....	76
8	CONCLUSÃO	77
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
10	ANEXOS.....	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Data Center <i>colocation</i> (TelecityGroup, 2014).	10
Figura 2.2. Espelhamento em Data Centers (Compliance Training Solutions, 2013).....	11
Figura 2.3. Sala cofre e seus subsistemas (GrupoOrion, 2009).	13
Figura 2.4. Sistema de alimentação elétrica.	14
Figura 2.5. Ciclo básico de refrigeração.	16
Figura 2.6. Linha do tempo para a dissipação térmica dos ativos de TI.	18
Figura 2.7. Gráfico psicrométrico - limites operacionais da ASHRAE.	19
Figura 2.8. Disposição dos corredores frios e quentes.	20
Figura 2.9. Dutos de climatização (EIA, 2013).....	21
Figura 2.10. Insuflamento superior (Блог компании King Servers, 2013).	22
Figura 2.11. Sistema suplementar de climatização (Datacenter Dynamics, 2013).	23
Figura 2.12. Sistema suplementar de climatização.	23
Figura 2.13. Enclausuramento dos corredores frios.	24
Figura 2.14. Recirculação.	25
Figura 2.15. By-pass.	26
Figura 2.16. Consumo de recursos em um ciclo de vida ideal.	27
Figura 2.17. Consumo de recursos em um ciclo de vida real.	27
Figura 3.1. Ferramenta de CFD aplicada à Data Centers.	33
Figura 4.1. Modelo teste.....	36
Figura 4.2. Mapa de referências.	37
Figura 4.3. Disposição dos equipamentos de TI.	38
Figura 4.4. Domínio do Equipamento de TI.	39
Figura 4.5. Estrutura do rack de rede G4.	40
Figura 4.6. Obstrução do rack de rede G4.....	41
Figura 4.7. Estrutura do rack G8.	41
Figura 4.8. Ventiladores topo de rack.	42

Figura 4.9. Estrutura do rack B8.	42
Figura 4.10. Estrutura do rack B10.	43
Figura 4.11. Evaporadoras.	43
Figura 4.12. Domínio do equipamento de ar condicionado.	44
Figura 4.13. Tubulação do sistema de ar condicionado e combate ao incêndio.	45
Figura 4.14. Quadros X e Y de distribuição.....	45
Figura 4.15. Quadros X e Y de distribuição.....	46
Figura 4.16. Obstruções por cabeamento não estruturado sob as placas E8, E9 e E10.	46
Figura 4.17. Modelagem da obstrução sob as placas E8, E9 e E10.	47
Figura 4.18. Tomada de alta amperagem (Rauscher Stoecklin, 2011).....	47
Figura 4.19. Modelagem de tomadas de alta amperagem.	48
Figura 5.1. Criação da Geometria (a) e Domínio (b) do Data Center.	49
Figura 5.2. Campos de pressão para os diferentes graus de refinamento.....	51
Figura 5.3. Temperaturas de insuflamento para os diferentes graus de refinamento.	51
Figura 5.4. Temperaturas de retorno para os diferentes graus de refinamento.	52
Figura 6.1. Analisador de energia.	53
Figura 6.2. Balômetro matricial.	54
Figura 6.3. Sensores de temperatura (iButtonLink, 2014).	55
Figura 6.4. Perfil de temperatura central na entrada do rack G7.....	55
Figura 6.5. Análise dos iButtons – Temperatura nas máquinas de ar condicionado.....	57
Figura 7.1. Campo de pressão abaixo do piso elevado.	59
Figura 7.2. Campo de temperatura abaixo do piso elevado.	60
Figura 7.3. Campo de velocidade abaixo do piso elevado.	61
Figura 7.4. Vazão por placa perfurada.	61
Figura 7.5. Vazão requerida por rack.....	62
Figura 7.6. Linhas de corrente nas placas de insuflamento no corredor B.....	63
Figura 7.7. Linhas de corrente nas placas de insuflamento no corredor G.	63
Figura 7.8. Recirculação nos ventiladores acima dos racks no corredor G.....	64

Figura 7.9. Curtos-circuitos de ar nos equipamentos de ar condicionado.....	64
Figura 7.10. Campo de temperatura no corredor frio B.	65
Figura 7.11. Campo de temperatura no corredor frio G.....	65
Figura 7.12. Campo de temperatura no corredor quente.	66
Figura 7.13. Recirculação no rack G10.....	66
Figura 7.14. Recirculação no rack G8.....	67
Figura 7.15. Temperatura média de entrada dos equipamentos de TI [falha da ACU 2].....	68
Figura 7.16. Disposição dos servidores padrão para o cálculo de Capacidade.	69
Figura 7.17. Superaquecimento após o desligamento dos ventiladores do corredor G.....	70
Figura 7.18. Escovas para passagens de cabos em piso elevado (Air-Guard, 2006).....	71
Figura 7.19. Pós vedação perimetral dos equipamentos de ar condicionado.	71
Figura 7.20. Rebalanceamento da vazão de ar insuflada.	72
Figura 7.21. Rearranjo dos ativos de TI.	72
Figura 7.22. Vedação dos slots vazios.	73
Figura 7.23. Melhoria nos racks G8 e G10.	73
Figura 8.1. Gráfico de performance.	77
Figura 10.1. Imagem termográfica do ambiente real.	94
Figura 10.2. Imagem termográfica do ambiente simulado.....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1. Quantitativo de elementos por malha.	50
Tabela 5.2. Tempo de convergência para os diferentes graus de refinamento.	52
Tabela 6.1. Análise do balômetro – Vazão nas placas perfuradas.	54
Tabela 6.2. Análise dos iButtons – Temperatura nos racks.	56
Tabela 6.3. Análise dos iButtons – Temperatura nas placas perfuradas.	56
Tabela 6.4. Análise comparativa dos sensores frontais.	58
Tabela 6.5. Análise comparativa dos sensores traseiros.	58
Tabela 7.1. Custo de material.	75
Tabela 7.2. Custo de mão-de-obra.	75
Tabela 10.1. Normas Técnicas.	84
Tabela 10.2. Características gerais do caso teste.	85
Tabela 10.3. Características gerais do caso real.	86
Tabela 10.4. Lista de Equipamentos.	87
Tabela 10.5. Especificações básicas do analisador de energia.	90
Tabela 10.6. Especificações básicas do balômetro matricial.	91
Tabela 10.7. Especificações básicas dos sensores de temperatura.	92
Tabela 10.8. Especificações básicas do termômetro.	93
Tabela 10.9. Análise de energia dos quadros de distribuição.	95
Tabela 10.10. Plantas baixa da sala cofre do caso real.	97

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

t	Tempo
u, v	Velocidade
p	Pressão
k	Energia cinética turbulenta
e_t	Energia total
q	Calor transferido

Símbolos Gregos

ρ	Massa específica
τ_{ij}	Tensor de tensões viscosas
ε	Dissipação de energia cinética turbulenta
τ	Tensor de tensões
μ	Viscosidade

Subscritos

e	Evaporador
c	Compressor

Siglas

ABNT	Agência Brasileira de Normas Técnicas
ACU	Air Conditioning Unit
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers
BS	British Standard
COP	Coeficiente de Performance
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFTV	Circuito Fechado de TV
CPD	Centro de Processamento de Dados
DCiE	Data Center Infrastructure Efficiency
DIN	Deutsches Institut für Normung
EPA	Environmental Protection Agency - United States
PUE	Power Usage Effectiveness
TI	Tecnologia da Informação

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é feito um briefing geral a fim de se mostrar o contexto histórico relevante ao estudo, além de citar trabalhos já foram desenvolvidos na área, podendo ser eles acoplados ao mercado consumidor ou pesquisas acadêmicas. É feito também uma discussão do tema abordando todos os objetivos que almeja-se alcançar com o trabalho proposto.

1.1 O TEMA EM ESTUDO E SUA RELEVÂNCIA

Data Centers são basicamente uma estrutura física sendo, sala ou edifício que foi projetado para abrigar uma variedade de recursos que fornecem armazenamento e gerenciamento de equipamentos de rede, servidores e telecomunicação. O dia-a-dia na maioria das cidades dependem do bom funcionamento e da disponibilidade de um ou de vários ambientes como este, eles controlam quase tudo em cada segmento da atividade humana, sendo ela energia, iluminação, telecomunicações, internet, transportes, tráfego urbano, bancos, sistemas de segurança, saúde pública, entretenimento ou até integridade física das pessoas.

Em suma, o bem-estar e a segurança de bilhões de seres humanos estão entregues a esses centros de controle e supervisão de dados e informações. A maioria das pessoas, talvez, nem se preocupe muito com isso, mas as grandes corporações e as instituições públicas, por outro lado, têm a obrigação de levar este assunto a sério.

Para se ter um parâmetro da grandiosidade dessas corporações pode-se citar a Google, o Facebook e a Microsoft. Juntas, até 2010, essas companhias eram responsáveis por mais de 14% da pegada de carbono do setor e consumiam energia suficiente para abastecer mais de meio milhão de residências convencionais (Kooimey, 2011). Segundo o site *Data Center Knowledge*, reconhecida organização mundial de levantamentos de dados para Data Centers, a Google possui hoje treze Data Centers distribuídos ao redor do mundo, os quais comportam mais de 1 milhão de servidores e consomem algo em torno de 0,01% de toda a energia produzida no mundo, o Facebook possui armazenado em seus storages mais de 100 petabytes de dados e a Microsoft, que iniciou suas atividades do ramo em 1989 com ambientes básicos de armazenamento de placas físicas, já investiu até hoje mais de 15 bilhões de dólares em seus centro de dados (Gaille, 2013).

Em 2012, a Embratel anunciou seu novo Data Center no Brasil, erguido na capital paulista. Foram investidos mais de 100 milhões de reais, em uma área que ocupa 7 mil metros quadrados, no bairro Lapa, e tem capacidade para 150 mil servidores. Com a instalação, a Embratel passa a contar com cinco centros de dados no Brasil.

A Locaweb, empresa líder em *hosting* na América Latina, segundo o IDC Brasil (*International Data Corporation*), inaugurou seu último Data Center em 2010, em São Paulo. Este módulo conta com capacidade para 25 mil servidores.

A IBM foi outra grande empresa que investiu pesado em Data Center. A empresa norte americana desembolsou 10 milhões de dólares na unidade recém inaugurada em Hortolândia, São Paulo. A Microsoft e a Oracle inauguraram novos Data Centers no Brasil em 2014, mas ainda sem informações quanto à capacidade.

Como pode-se notar, os números mundiais e nacionais para o gerenciamento de dados são muito expressivos, principalmente no âmbito de consumo energético e dissipação de calor. Em Data Centers típicos, os equipamentos de TI convertem mais de 99% de seu consumo elétrico em calor, correspondendo a mais de 70% de todo o calor que precisa ser retirado do ambiente a fim de se assegurar a sua aceitabilidade, tanto no âmbito de sala quanto nos equipamentos. Sendo assim, o custo de operação do sistema de climatização corresponde a uma larga porção do custo energético total, chegando a 25% ou mais de toda a energia consumida em um Data Center típico (Kant, 2009), tornando cada vez mais forte a ideia de que aumentar a eficiência do sistema de climatização é a chave para a economia energética e financeira.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os Data Centers possuem como função primordial o armazenamento, processamento e transmissão de dados ao longo de sua rede ou até mesmo dentre os seus ativos de TI. Dada sua natureza, seu consumo energético é elevado e costuma representar boa parte do gasto de energia de toda a edificação, podendo consumir mais que 40 edifícios comerciais convencional (Lu, et al., 2011). Nos Estados Unidos, por exemplo, esses ambientes de missão crítica são responsáveis por 1,5% de todo o consumo de energia do país (Patterson, et al., 2006), valor que dobrou nos cinco anos seguintes.

Como pioneiro no ramo da tecnologia da informação, os Estados Unidos foi a fonte de grande parte dos estudos durante as décadas de 70', 80' e 90', quando o desenvolvimento era modesto e muito ligado às boas práticas e gestão ambiental, uma vez que a tecnologia de climatização e suporte para esses ambientes era relativamente avançada e capaz de suprir com folga a demanda da época. Por volta do ano 2000, o aumento da densidade dos equipamentos de TI e de suas dissipações térmicas nos microprocessadores passou a exigir um desempenho superior dos sistemas de climatização, estimulando o desenvolvimento de novas tecnologias e procedimentos de gestão.

A fim de se evidenciar essa necessidade de se potencializar a climatização dos Data Centers, diversas empresas começaram a desenvolver estudos que contemplassem as vantagens da alta climatização em seus dispositivos, como no caso da Seagate Technology. Conhecida pelos seus dispositivos de armazenamento, em 2001 a companhia norte americana desenvolveu um estudo sobre o desempenho de

seus discos rígidos em função da temperatura de operação, sendo assim, ela concluiu em seu trabalho que o tempo médio entre falhas, do inglês *Mean Time Between Failures*, diminui em 40% para cada aumento de 10 graus Celsius na temperatura de operação (Wang, 2006).

Estava ficando cada vez mais claro que a climatização vinha se tornando um empecilho para os novos desenvolvimentos e precisava ser aprimorada, a passos largos. Sendo assim, e percebendo que os avanços no ciclo de refrigeração não eram suficientes para alcançar os objetivos finais, começaram a ser realizados alguns estudos de eficiência em escoamento de ar na Universidade de Hokkaido, Japão, pelo engenheiro, e então professor, Yuki Furihata. Segundo o autor em seu trabalho publicado em 2003, a eficiência dos sistemas de climatização em ambientes de Data Center pode ser definida pela razão entre o volume de ar refrigerado pelo sistema de climatização pelo volume de ar útil utilizado para refrigerar os equipamentos de TI, ou seja, caso o valor dessa razão seja menor do que 1, pode-se concluir que a demanda de ar pelos equipamentos é superior à disponibilizada pela climatização e, conseqüentemente, falhas como recirculação de ar devem estar ocorrendo no ambiente (Furihata, et al., 2013).

Como continuidade ao estudo anterior, no mesmo ano o também engenheiro Hirofumi Hayama publicou um trabalho em que vislumbrou aplicar a teoria de recirculação a um caso real, um Data Center edifício em Saiatama, Japão. Segundo sua publicação, caso o problema de recirculação de ar fosse tratado, o empreendimento em questão teria como resposta uma economia de 16% no consumo de energia dos equipamentos de ar condicionado (Hayama, et al., 2003).

O tratamento de recirculação pode ser dado por diferentes estratégias de acordo com a característica do escoamento, assim como vamos ver mais à frente nesse trabalho. Uma das mais importantes foi abordada em 2004 por um grupo de engenheiros dentre os quais se destaca novamente o Yuki Furihata. Neste novo trabalho são realizadas uma série de estudos experimentais dentre os quais se conclui que reduzindo pouco mais de 60% dos espaços dentre os equipamentos de TI, por vedação ou realocação dos mesmos, pode-se melhorar o potencial de climatização em mais de 10% (Furihata, et al., 2004).

Apesar de todo o avanço e estudo para aumentar cada vez mais a eficiência na capacidade de climatização dos Data Centers, em alguns casos extremos e específicos a climatização a ar ainda não era capaz de suprir a necessidade de dissipação de alguns dispositivos. Uma abordagem mais detalhada foi realizada no artigo científico de Michael J. Ellsworth em 2005, no qual expõe o gral de dissipação dos equipamentos de TI ao longo dos anos. Tomando-se esse fato que o autor se baseia a fim de propor uma nova solução, o *watercooling*. Como melhor condutor de calor, nos testes, a água foi capaz de retirar até 5 vezes mais calor quando comparada à forma tradicional de ar, *aircooling* (Ellsworth, 2005).

Voltando à climatização convencional, em 2006 o PhD David Wang publicou um estudo para o caso de climatização com insuflamento pelo piso elevado, formando o chamado *plenum*. O objetivo deste trabalho foi estudar o comportamento do escoamento de ar e distribuição de pressão abaixo do piso de acordo com algumas variáveis de posicionamento e altura. Pode-se verificar com ele a baixa eficácia de

placas perfuradas em regiões periféricas às máquinas de climatização em pisos relativamente baixos, neste caso, pode-se resolver o problema elevando-se a altura do mesmo para uma distribuição mais homogênea (Wang, 2006).

A constatare necessidade de se entender e gerenciar o fluxo de ar nos ambientes motivou o desenvolvimento de softwares de fluidodinâmica computacional (CFD) passíveis de serem implementados em análises de Data Centers, com o intuito de fornecer aos projetistas e gestores uma compreensão mais profunda de suas instalações. Foi com base em um software como esse que o PhD Magnus K. Herrlin, membro ASHRAE, desenvolveu uma metodologia simples para a definição de performance para Data Centers: o RCI, do inglês *Rack Cooling Index*, o qual mensura a climatização dos equipamentos gerais de TI, e o RTI, também do inglês *Return Temperature Index*, que tem por objetivo mensurar a performance do gerenciamento de ar do sistema (Herrlin, 2008).

A aplicação da ferramenta de análise numérica passou a ser cada vez mais corriqueira dentre as pesquisas acadêmicas. Fazendo referência a um artigo já comentado e publicado em 2004, um grupo de pesquisadores indianos escreveram um artigo onde colocam a ideia analítica estudada anteriormente em validação por meio de um modelo computacional em CFD. Segundo os autores, a aplicação da boa prática de vedação dos espaços entre equipamentos permite uma redução de até 20% no gasto energético do sistema de climatização (Singh, et al., 2010).

Essa ação de se fazer simulações computacionais de situações já antes previstas começaram a ser cada vez mais frequentes e tiveram como objetivo melhorar cada vez mais a ferramenta de simulação numérica. Como exemplo de avanço nas simulações podemos citar o trabalho de Baptiste Durand-Estebe que basicamente sugere um diferente método de modelamento dos equipamentos de TI (Durand-Estebe, et al., 2013).

A tendência futura é a de se usar as simulações numéricas em toda a cadeia de TI associada à Data Centers, iniciando-se com análises de dissipação térmica de microprocessadores, realizadas pelos fabricantes de componentes eletrônicos, passando por estudos de climatização de ativos, realizados pelas fabricantes de equipamentos de TI, e culminando com avaliações de eficiência de climatização de instalações inteiras, realizadas pelas equipes de projeto e operação de Data Centers.

1.3 OBJETIVOS E METAS

As simulações têm sido bastante utilizadas durante a fase de projeto de novas instalações, pois permitem aos projetistas avaliarem com custo mínimo diversas opções de layout e disposição de equipamentos. Atualmente, entretanto, a utilização do CFD para análise de Data Centers em operação tem se popularizado bastante, pois, com a rápida evolução dos equipamentos de TI e com a falta de planejamento na introdução de novos ativos, muitas instalações têm sofrido com acentuadas perdas de capacidade e diversos problemas de climatização, o que diminui a capacidade de operação dos equipamentos e faz com que o Data Center chegue ao seu limite operacional muito antes do esperado.

Dentre as diversas aplicações do CFD para análise de instalações existentes, destacam-se: identificação de *hot spots*, zonas com focos de temperatura muito elevados, capazes de danificar os equipamentos; identificação de regiões de recirculação, zonas nas quais o ar quente expelido pelos equipamentos de TI retorna para a região de entrada; identificação de focos de *by-pass*, que ocorrem quando o ar frio retorna para as ACUs sem ser aproveitado por nenhum equipamento; análise de modificações de *layout*, distribuição de ativos de TI, perfil de operação das ACUs, *setpoints*, etc.; otimização dos ambientes; simulação de falhas das ACUs, para antecipar o comportamento da sala mediante o desligamento de uma ou mais máquinas; e suporte técnico à decisão.

A abrangência e a versatilidade do CFD fazem com que ele seja utilizado não apenas como uma ferramenta de análise numérica, mas também como facilitador da comunicação entre as diferentes partes envolvidas na gestão de Data Centers, incluindo os departamentos de TI, infraestrutura, operação e manutenção. Por todos os motivos apresentados, o CFD tornou-se hoje parte integrante e indispensável dos mais importantes Data Centers do planeta.

Sendo assim, o presente trabalho tem por objetivo propor uma metodologia de estudo e otimização, com base na ferramenta de CFD, capaz de aprimorar ao máximo a eficiência e alocação dos recursos de climatização internos à um Data Center comum. Uma vez estruturado o plano de ação, aplicou-se a metodologia à um ambiente já operacional, no qual extraiu-se todos os seus parâmetros de performance, evidenciando os benefícios e retornos financeiros que podem, e devem, ser alcançados após a aplicação das melhorias propostas ao final.

1.4 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos aqui propostos, será desenvolvida, neste trabalho, uma metodologia de definição de estado o qual permitirá avaliar a performance e a situação real do Data Center com base em valores quantificáveis. O objetivo de se desenvolver essa metodologia é permitir uma comparação adimensional dos ambientes para uma posterior análise de otimização.

Porém, por tratar de um ponto de vista de climatização, é necessário utilizar dentre outras ferramentas a fluidodinâmica computacional, CFD. Somente por meio desta é possível a construção de um modelo virtual do Data Center para realização de simulações com o intuito de avaliar a eficiência do sistema de climatização instalado e estudar o impacto de modificações.

Por fim, uma vez desenvolvida a metodologia de cálculo e análise ambiental, a segunda parte deste projeto deverá propor uma série de modificações para a otimização do sistema de climatização em um Data Center real em operação que, de acordo com um estudo financeiro aplicado, deve resultar em um ganho financeiro de custo-benefício.

1.5 ESTRUTURA DO RELATÓRIO

Ao longo deste trabalho serão abordados diversos assuntos dentre os quais visam como objeto final um estudo detalhado de otimização para um Data Center já em operação, sendo assim, esses conteúdos serão aqui subdivididos em diferentes capítulos a fim de auxiliar o leitor na assimilação do conteúdo.

O capítulo inicial possui um caráter introdutório e têm como objetivo principal posicionar o leitor quanto às metas finais do projeto de graduação frente às relevâncias de mercado. Sendo assim, foi realizada uma detalhada revisão bibliográfica citando de forma cronológica uma série de trabalhos e estudos realizados no mercado de Data Centers, podendo ser eles comerciais ou educacionais.

No segundo capítulo é realizada a revisão teórica, rica em definições e conceitos que devem compor o problema de Data Center e seus subsistemas, dando-se ênfase à climatização e distribuição de ar. Ainda no mesmo capítulo é feita uma breve apresentação de algumas boas práticas.

Mais à frente, no capítulo 3, é definida a metodologia de definição de estado que visa a medição de performance por disponibilidade, capacidade e eficiência, além de uma apresentação da principal ferramenta de análise aqui usada, o CFD.

Nos subsequentes, capítulos 4, 5 e 6, são apresentadas a metodologia de modelagem, passando por apresentar as considerações de cada sistema, o estudo de malha, a instrumentação do ambiente real para coleta de informações e parâmetros físicos de operação, e a definição do modelo final de alta confiabilidade para a análise de estudo.

O capítulo 7, talvez o mais importante, realiza uma completa análise do Data Center real após a simulação, abordando todas as suas características e falhas que determinam as perdas de performance. Em seguida é realizado um plano de propostas de melhorias com base em novas simulações. Ao longo dele é aplicada a metodologia de definição de estado a fim de comparar a evolução do ambiente antes e depois das modificações.

Por fim, no oitavo capítulo, é feita uma conclusão de resultados destacando o alcance de todos objetivos e metas propostos previamente.

2 REVISÃO TEÓRICA

Este segundo capítulo do trabalho traz uma revisão teórica, rica em definições e conceitos que devem compor o problema de Data Center e seus subsistemas, dando-se ênfase à climatização e distribuição de ar. Ainda neste capítulo é feita uma breve apresentação de algumas boas práticas.

2.1 DATA CENTERS

Data Centers podem ser definidos por ambientes utilizados para abrigar sistema de computadores de processamento de dados e componentes associados, como sistemas de armazenamento e de telecomunicações. Geralmente, incluem sistemas redundantes de ar condicionado e energia, conexões de comunicação de dados, monitoramento ambiental, como por sensores de temperatura, vibração, umidade e incêndio, e dispositivos de segurança, como controle de acesso e CFTV – Circuito Fechado de TV (Brito Carrijo, 2013).

2.1.1 História

Instalações de centro de dados têm suas origens nas grandes salas de computadores nos primórdios da indústria de informática. Os primeiros computadores eram de operação complexa e exigiam um ambiente especial para a sua operação. Muitos cabos eram necessários para conectar todos os componentes e soluções para acomodá-los e organizá-los foram criadas, como racks padrão para montar equipamentos, pisos elevados e cabeamento estruturado. Além disso, um único mainframe necessitava de bastante energia e teve que ser refrigerado para evitar o superaquecimento. A segurança era importante, pois os equipamentos eram caros e foram, muitas vezes, utilizados para fins militares, contendo, assim, informações sigilosas. Deste modo, diretrizes básicas para controlar o acesso à sala de computador foram inventadas.

Na década de 60, foram desenvolvidos os primeiros computadores de uso comercial e deflagrou a sua dispersão. As empresas norte americanas American Airlines e IBM se uniram para desenvolver um programa denominado de *Sabre System* e foi instalado, na IBM, 7090 computadores em um centro de computadores em Briarcliff Manor, Nova Iorque, o qual processava 84000 telefonemas por dia.

No início da década de 70, a Intel desenvolveu o primeiro microprocessador comercial: o 4004. Gestores de Data Centers nos Estados Unidos começaram a documentar alguns planos formais de recuperação de desastres em 1973.

Durante a década de 80, a indústria da informática vivenciou a deflagração dos microcomputadores graças à criação do Computador Pessoal da IBM (PC). Portanto, permitiu que computadores fossem instalados em qualquer lugar e pouca atenção foi dada aos requisitos operacionais das máquinas. Como

as tecnologias de informática começaram a crescer, inúmeras empresas surgiram devido à ambição de controlar recursos de TI.

Microcomputadores, chamados de servidores, começaram a ganhar espaço nas antigas salas de computadores e originaram o termo centro de processamento de dados. A deflagração dos Data Centers foi no surgimento da internet, onde empresas sentiram a necessidade de conexões mais rápidas e operações ininterruptas. A Rackspace Hosting abriu o primeiro Data Center para negócios em 1999.

Na década de 2000, as grandes instalações de Data Centers despontaram e, em 2007, o consumo de energia médio de um data center atingiu o equivalente a 25000 casas e esse cresce cerca de 10% por ano. Existem 5,75 milhões de novos servidores sendo implantados por ano. Devido ao elevado uso de energia das instalações de Data Center, despontou a necessidade de novas concepções de complexos mais eficientes, chamados “verdes”, como o Projeto OpenCompute, da empresa Facebook, implantado na cidade de Prineville, Oregon, o qual utiliza 38% menos energia para o mesmo trabalho e com custo 24% menor (Brito Carrijo, 2013).

2.1.2 Tipos de Data Centers

Existem basicamente três tipos de Data Centers que se diferenciam de acordo com a sua finalidade e forma de operação, sendo eles: os *enterprise*, usados para atender às necessidades de um único cliente e não sendo compartilhados por outro, podem ser entendidos como Data Centers montados e operados pelo próprio usuário final; os *internet*, como o próprio nome sugere, são aqueles que oferecem todo o ambiente de processamento de dados para a hospedagem de sites ou serviços de acesso interno à empresas, são caracterizados por proverem toda a infraestrutura de TI, instalações elétricas, de ar condicionado, segurança, além do gerenciamento operacional; por fim, os *colocations*, assim chamados por entregarem toda a infraestrutura vista no modelo anterior, porém sem os ativos de TI, sendo assim, cabe ao cliente comprar, instalar e operar os equipamento que julgarem necessários para a sua atividade.

O Data Center da Figura 2.1 extraída do site comercial da companhia europeia TelecityGroup, localiza-se em Paris, França, e possui aproximadamente seis mil e trezentos metros quadrados em ambiente para *colocation*. A forte infraestrutura de segurança, com grades e fechaduras ao redor dos racks, é uma característica comum nos *colocations* uma vez que eles hospedam os equipamentos de TI dos clientes e devem garantir a integridade física (TelecityGroup, 2014).



Figura 2.1. Data Center colocation (TelecityGroup, 2014).

2.1.3 Segurança

A disponibilidade do Data Center deve ser garantida para qualquer que seja a sua finalidade, sendo assim, as arquiteturas de TI costumam incorporar soluções de recuperação de catástrofe que garantem que os sistemas e informações permaneçam acessíveis em caso de eventos imprevistos prejudicarem suas operações. Essas soluções podem abrigar metodologias que vão desde uma redundância simples de sistemas de climatização e elétrico, até soluções de armazenamento proprietárias que espelham atualizações de disco em subsistemas de armazenamento remotos em um ou mais Data Centers espalhados, o chamado espelhamento.

Na Figura 2.2 pode-se notar um exemplo que é feito nos Estados Unidos pela empresa Compliance Training Solutions, a qual possui três Data Centers espelhados ao longo das cidades de Washington, Dallas e Seattle. Conectados por uma rede de transmissão em fibra óptica de 10 Gbps, esses ambientes são capazes de, em caso de falha ou catástrofe, suprir a demanda e disponibilizar todos os dados resguardados em site (Compliance Training Solutions, 2013).



Figura 2.2. Espelhamento em Data Centers (Compliance Training Solutions, 2013).

O espelhamento remoto proporciona uma certa proteção aos dados quanto à disponibilidade, mas ao entrar no mercado brasileiro por exemplo, onde uma parcela considerável dos ambientes de centro de dados é governamental, a proteção de chaves privadas que assinam certificados digitais passa a ser uma nova prioridade, ou seja, além de garantir a disponibilidade, os Data Centers devem ser áreas de segurança restrita, formada por cofre com proteção eletromagnética, física e contra fogo.

2.1.4 Normas

No início, a construção de Data Centers foi baseada em recomendações de fabricantes de *mainframes*, de equipamentos de TI e na experiência dos próprios engenheiros e analistas que o projetavam. Isso acarretava em um disparate nas especificações de instalação e operação dos Data Centers. Assim, para pôr fim nesta disparidade, criaram-se padrões que foram formalizados em normas que regulamentam e padronizam a construção e operação de novos Data Centers, a ANSI/TIA/942 (*Telecommunications Infrastructure Standard for Datacenters*) e a ASHRAE TC-9.9 (*Thermal Guidelines for Data Processing Environments – Expanded Data Center Classes and Usage Guidance*). Inicialmente com abrangência apenas nos EUA, todavia, projetistas em outras localidades passaram a segui-la.

Hoje, o tema Data Center é bem amparado pela Agência Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) a qual atua por mais de sete décadas fornecendo a base necessária ao desenvolvimento tecnológico brasileiro, e há pelo menos trinta anos regulamentando os diferentes sistemas dos ambientes de processamento de dados.

Dado ao escopo de trabalho, foi feito um estudo a fim de se citar algumas normas que se aplicam de forma direta ao sistema de climatização para Data Centers e que ainda estejam em vigor. Destacam-se

a primeira norma técnica datada de 1987, ABNT NBR 10.080, com o objetivo normalizar os procedimentos das instalações de ar-condicionado para salas de computadores, e a ABNT NBR 15.976 de 2011, ligada às emissões de halogênios por fluidos frigorígenos. Ao todo foram estudadas oito normas técnicas que definem requisitos, procedimentos e métodos de ensaios dos mais diferentes tipos, suas especificações encontram-se em tabela no Anexo I e são acompanhadas de uma breve explicação dos assuntos abordados.

2.2 SALA COFRE

A sala cofre é um ambiente estanque que protege o Data Center, seu interior, contra ameaças físicas incluindo fogo, calor, umidade, água, fumaça, arma de fogo e acesso indevido. Normalmente é construída de forma modular, o que permite ser ampliada ou deslocada para outro local sem comprometer a sua integridade.

Originado no continente europeu, o conceito de sala cofre foi abordado inicialmente pela agência normalizadora alemã, *Deutsches Institut für Normung* (DIN), que desenvolveu a norma europeia DIN EN 1047-2 em 1999. Essa norma basicamente define critérios de testes de fogo e impacto a que célula de segurança deve ser submetida para certificação. Em 2009 essa norma foi revisada pela agência britânica, *British Standard* (BS), e passou a ser conhecida por BS EN 1047-2.

Sendo assim, em 2004 a ABNT desenvolveu o Procedimento de Certificação ABNT-INMETRO PE 047.01, baseando-se na normalização europeia, na NBR 11.515 (ligada aos limites de emergência) e na ISO 27.002. O Procedimento PE 047.01 inclui também uma série de testes de fogo, calor e umidade para mitigar outros riscos existentes baseado na norma NBR 15.427.

2.3 SISTEMAS EMBARCADOS

Um Data Center pode ser definido como sendo um ambiente multissistêmico, ou seja, um ambiente que é gerido por um conjunto de sistemas interdependentes que permitem sua operação e alimentação de forma precisa e segura.

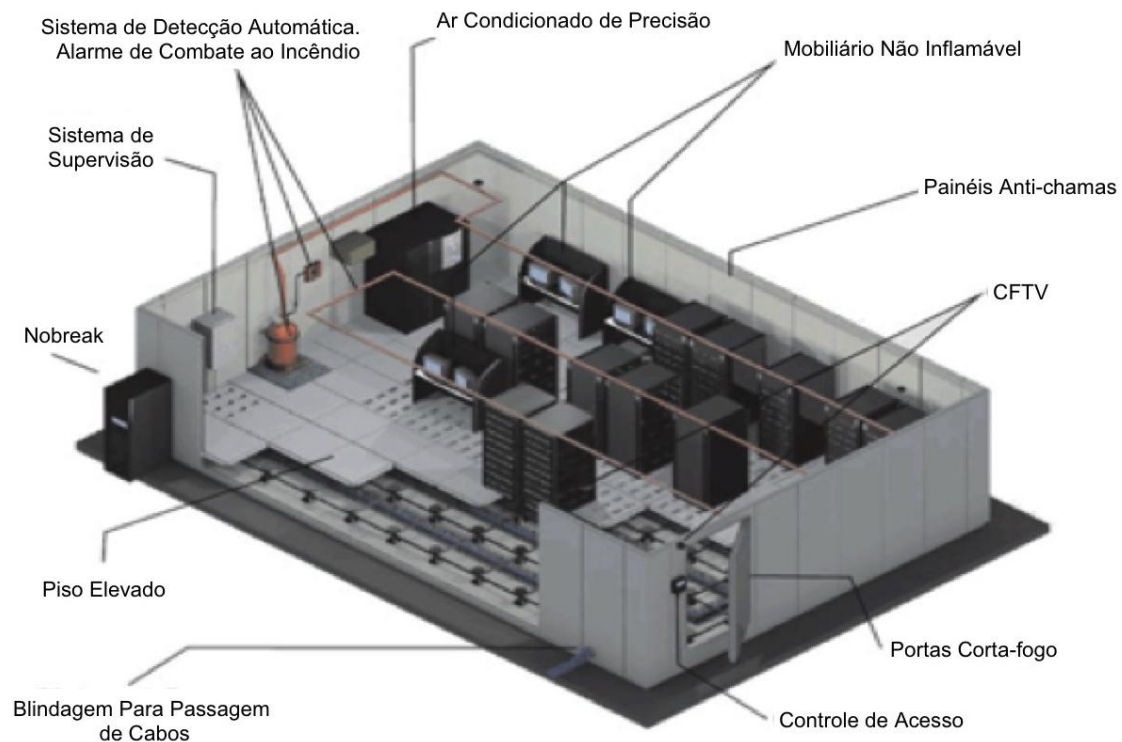


Figura 2.3. Sala cofre e seus subsistemas (GrupoOrion, 2009).

Na Figura 2.3 pode-se notar o produto de sala cofre da empresa alemã Lampertz, a qual é a única fabricante certificada diante à normalização brasileira. Nela é feito um descritivo de todos os sistemas embarcados no ambiente, sendo eles operacionais, onde podemos destacar os sistemas de controle de acesso e detecção de incêndio, ou de alimentação, como os sistemas elétricos e de climatização.

2.4 SISTEMA ELÉTRICO

O sistema mais crítico presente em um Data Center é, indiscutivelmente, seu sistema de distribuição elétrica. Por questões óbvias a alimentação elétrica dos equipamentos críticos de TI deve ser contínua e estar disponível durante cem por cento do tempo; naturalmente esta é a condição ideal e estaria associada a uma disponibilidade máxima. Para garantir tal disponibilidade, sistemas auxiliares de alimentação elétrica são agregados aos componentes de distribuição convencional.

O sistema elétrico de um Data Center pode ser facilmente explicado tomando-se como suporte a Figura 2.4.

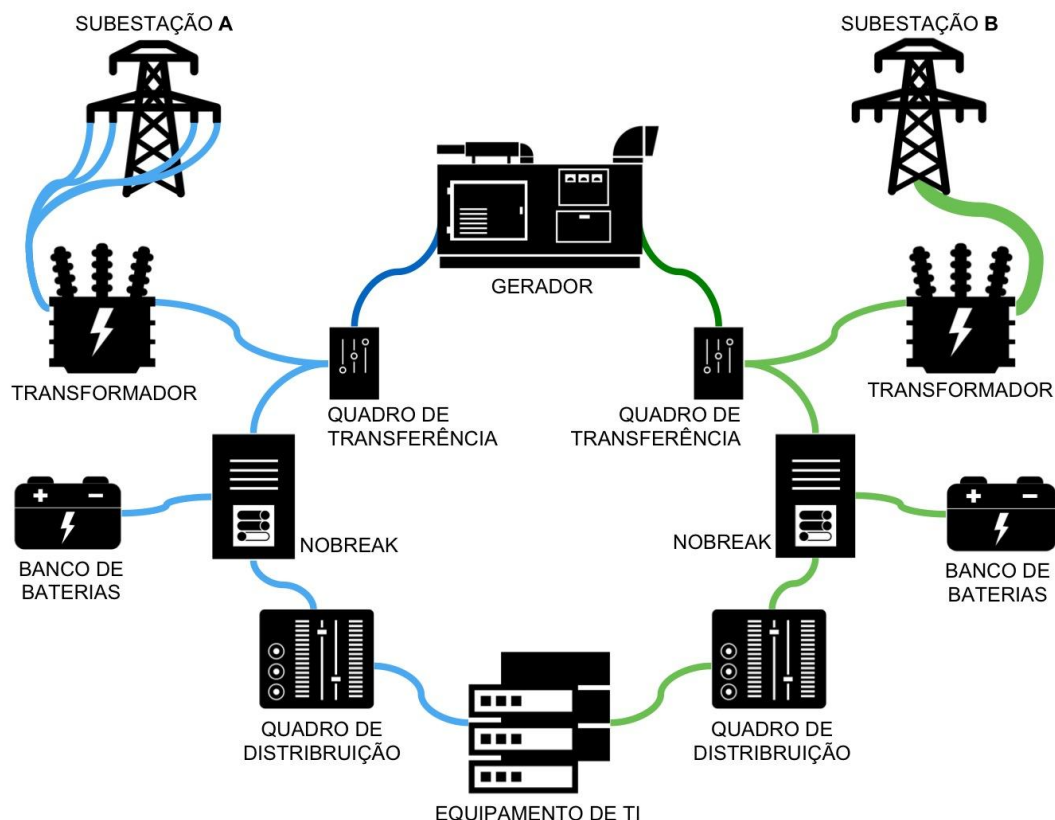


Figura 2.4. Sistema de alimentação elétrica.

Em geral, com uma alimentação principal em média tensão proveniente da concessionária de energia, o transformador inicial tem como objetivo baixar ainda mais essa tensão da fonte para uma trifásica de 380 Volts, aplicável aos barramentos do quadro de distribuição.

A título de informação, a Concessionária Energética de Brasília fornece a energia em uma tensão média de 13 mil Volts.

Apesar da tensão após o transformador já ser regulada para a alimentação dos quadros, o sistema não é ligado de forma direta à rede pois qualquer queda ou pico de energia poderia facilmente derrubar ou danificar uma série de componentes do sistema de TI. Sendo assim, essa alimentação da concessionária é posta em paralelo com um grupo gerador corretamente dimensionado para a carga de consumo do sistema. Em caso de falha da rede, é dada a partida do grupo que em alguns segundos já é capaz de estabilizar a frequência e fornecer a energia. O responsável pela transição de alimentação é o quadro de transferência.

Mais abaixo podemos notar o sistema de nobreak ligado à um banco de baterias. O seu objetivo principal é permitir que a alimentação da sala cofre não seja comprometida durante a fase de transição da queda de energia por parte da rede até a operacionalidade do grupo gerador, tempo o qual deve girar

em torno de alguns poucos minutos para o caso de carga máxima do ambiente. Uma segunda tarefa seria estabilizar corrente do circuito, eliminando os eventuais ruídos e picos de energia.

Uma vez garantida a alimentação contínua do sistema elétrico, os circuitos são subdivididos por meio dos quadros de distribuição que, por sua vez, tem o objetivo de alimentar de forma segura os equipamentos de TI. É muito comum que nessa etapa haja mais um meio de redundância, ou seja, são instalados dois quadros de distribuição X e Y permitindo operações de desligamento sem prejudicar os equipamentos com redundância em fonte.

2.5 SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO

Por motivos de segurança, o sistema elétrico acima descrito é um sistema exclusivo para a carga de TI, não sanando qualquer demanda de energia do sistema de climatização em caso de falhas. Sendo assim, nesses momentos, o sistema de climatização deve possuir uma redundância tal que também permita a operacionalidade ou, de acordo com a criticidade, tempo suficiente para que os procedimentos de segurança sejam tomados.

Aproximadamente cem por cento da energia elétrica usada no Data Center é convertida em calor que precisa ser retirado do ambiente. Há várias técnicas disponíveis atualmente que podem ser usadas pelos projetistas e operadores de Data Centers para que isso seja feito de forma eficiente. As técnicas de climatização vão desde o uso de equipamentos de ar condicionado de precisão estrategicamente dimensionados e instalados, o uso de bloqueios mecânicos para forças a entrada (e circulação) de ar frio em certas regiões dentro do ambiente, o uso de clusters fechados para maior eficiência, o uso de gabinetes com climatização própria, diferentes refrigerantes, diferentes arquiteturas de distribuição e circulação de ar dentro sem a necessidade de resfria-lo.

De forma bem geral, o modo de climatização desses ambientes críticos varia de acordo com o custo benefício ditado pela demanda de carga. Em ambientes relativamente pequenos, até 50 metros quadrados, é comum que a solução tomada seja por um sistema de expansão direta e equipamentos de precisão, deferentemente dos ambientes maiores onde o uso da expansão indireta passa a ser mandatório para a economia de energia.

Em Brasília esse panorama não é diferente. Com um número de Data Center abaixo dos 50 metros quadrados muito maior do que os demais, a solução de expansão direta passa a ser, em número, a predominante no mercado. Essa distinção de “em número” foi adotada pois caso fosse considerado o parâmetro de metragem total, a solução por expansão indireta passa a ser a mais notada, com destaque para as salas cofre do Banco do Brasil, Caixa Econômica Federal, Serpro e Oi Telecomunicações que juntas somam mais de 10 mil metros quadrados de ambiente para TI (Renner, 2012) (Banco do Brasil, 2013).

2.5.1 Conceitos de Termodinâmica e o Ciclo Básico de Refrigeração

O subsistema básico que compõe qualquer equipamento de refrigeração, definido como ciclo de climatização, utiliza transformações de estado físico de um fluido frigorígeno. Na Figura 2.5 é feita uma abordagem simplificada que ilustra as transformações termodinâmicas necessárias para a retirada do calor do ar, conceito que se aplica à climatização de um Data Center.

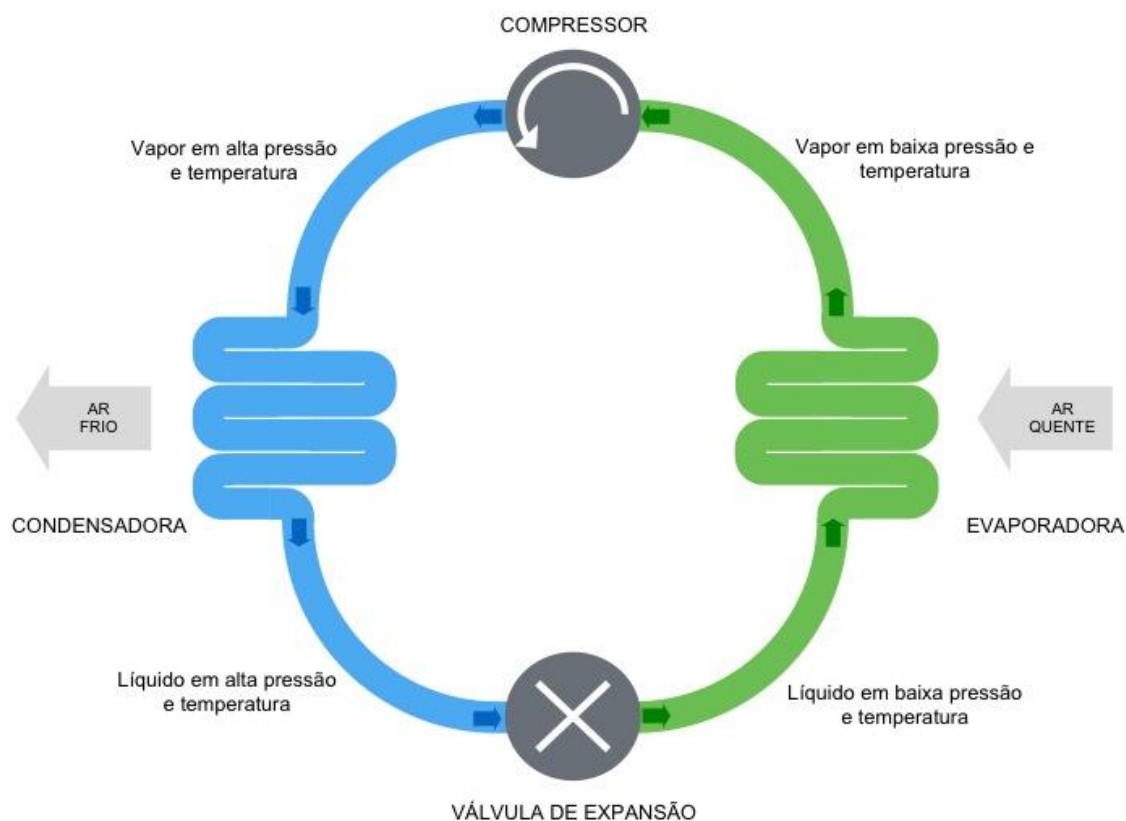


Figura 2.5. Ciclo básico de refrigeração.

O ciclo de refrigeração padrão por compressão consiste na repetição contínua dos processos de expansão do refrigerante, evaporação, compressão e condensação.

O fluido refrigerante na forma de líquido saturado passa pela unidade de expansão, onde é submetido à uma queda de pressão brusca, porém controlada que vai reduzir a pressão de condensação do fluido para a pressão de evaporação, passando a ter dois estados, o líquido e o gasoso. Como o processo é irreversível, a entropia do refrigerante, ao sair da válvula de expansão, é maior que a entropia do refrigerante ao entrar nela. A válvula de expansão é posicionada próximo à entrada do evaporador. É responsável por regular o fluxo de refrigerante que ingressará em baixa pressão no evaporador a uma

taxa capaz de manter a diferença de pressão dentro de limites ótimos, para garantir que todo o refrigerante seja evaporado antes de sair do evaporador.

Em seguida, o fluido predominantemente líquido é conduzido pela evaporadora através de uma serpentina que possui a finalidade única e objetiva de se ampliar a superfície de contato, facilitando a troca de calor com o ar que é forçado por um ventilador. O calor transferido ao refrigerante nessa etapa do processo não altera a temperatura do refrigerante, apenas seu estado físico de líquido para gasoso. Nessa etapa do processo, o agora gás refrigerante transporta o calor para fora do ambiente de TI.

Na etapa de compressão que é um processo reversível, a compressão do refrigerante ocorre à entropia constante. O refrigerante ingressa no compressor à pressão do evaporador e é então comprimido até atingir a pressão de condensação, estando agora aquecido a uma temperatura maior que a de condensação. O gás comprimido tem a propriedade de aumentar a sua temperatura; esse aumento de temperatura resultante da compressão é que permite que o calor retirado do ambiente seja transportado para fora dela.

Na condensadora é onde ocorre a rejeição de calor do ciclo, ou seja, é onde fluido na forma de gás saturado é condensado por meio da troca de calor com ar, liberando calor para o ambiente externo.

Quando se aplica à solução de um Data Center, deve-se escolher um refrigerante capaz de evaporar em um ciclo de refrigeração conforme descrito. Afinal, trata-se de ar quente a temperaturas próximas de 38°C provenientes da retirada de calor dos equipamentos críticos de TI instalados no ambiente. Para que isso seja possível, o refrigerante deve ser selecionado de tal forma que esse ciclo de refrigeração possa operar adequadamente. Há algumas soluções disponíveis no mercado que atendem a esses requisitos, bem como aos requisitos ecológicos de serem não inflamáveis e não tóxicos. A ASHRAE, *American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers*, é responsável pela especificação dos refrigerantes utilizados em sistemas de climatização.

2.5.2 Expansão Direta x Expansão Indireta

O sistema de ar condicionado por expansão direta é assim chamado porque o ar climatizado, produto final, troca calor diretamente com o fluido refrigerante por meio da serpentina localizada na evaporadora, coisa que não acontece na expansão indireta. Nesse segundo modelo, o equipamento de refrigeração troca calor com um líquido no cooler, normalmente a água, que é bombeada para uma serpentina de um segundo equipamento onde ocorre a troca de calor entre o ar e a água gelada.

Enquanto que o modelo por expansão direta é atrativo pelo simples fato do seu baixo preço de implementação, quando comparado ao modelo indireto, o sistema de água gelada se destaca por sua capacidade de atender à alta demanda de carga térmica, produzir pouco ruído no ambiente final, além de apresentar uma melhor eficiência energética (Thermos, 2014).

2.6 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE AR

Um parâmetro importante que interfere de forma direta no sistema de distribuição de ar é a densidade de carga elétrica a ser instalada nesse espaço. Alguns projetistas baseiam seus dimensionamentos adotando uma certa densidade de carga por área ocupada, ou seja, em watts por metro quadrado. Esta é uma abordagem de projeto antiga, quando era possível (ou viável) utilizá-la devido às características dos equipamentos instalados nos CPDs (Centro de Processamento de Dados), nome usado para Data Centers até a década de 90. Naquela época os equipamentos críticos de TI eram maiores e isso permitia que a relação quilowatt por metro quadrado fosse usada como referência.

Como os Data Centers modernos têm equipamentos críticos de TI cada vez menores, a densidade de equipamentos por rack ou gabinete vem sendo cada vez maior, podendo um único rack ter uma carga instalada da ordem de 30 kW (Schmidt, et al., 2005). Assim, uma abordagem de projeto mais moderna deve considerar a densidade de carga em watts por rack.

Na Figura 2.6 pode-se notar uma breve linha do tempo que ilustra a capacidade de dissipação dos equipamentos ao longo dos anos. Nos antigos CPDs, os *mainframes* eram computadores de grande porte que possuíam grandes entradas e saídas de ar, dessa forma o equipamento era capaz de realizar a troca térmica à baixa velocidade, coisa que não ocorre nos equipamentos mais modernos. Com a evolução dos ativos de TI, a geração de calor passou a ser mais elevada e o tamanho dos mesmos mais reduzido, exigindo maiores velocidades no escoamento interno para a retirada efetiva de calor.

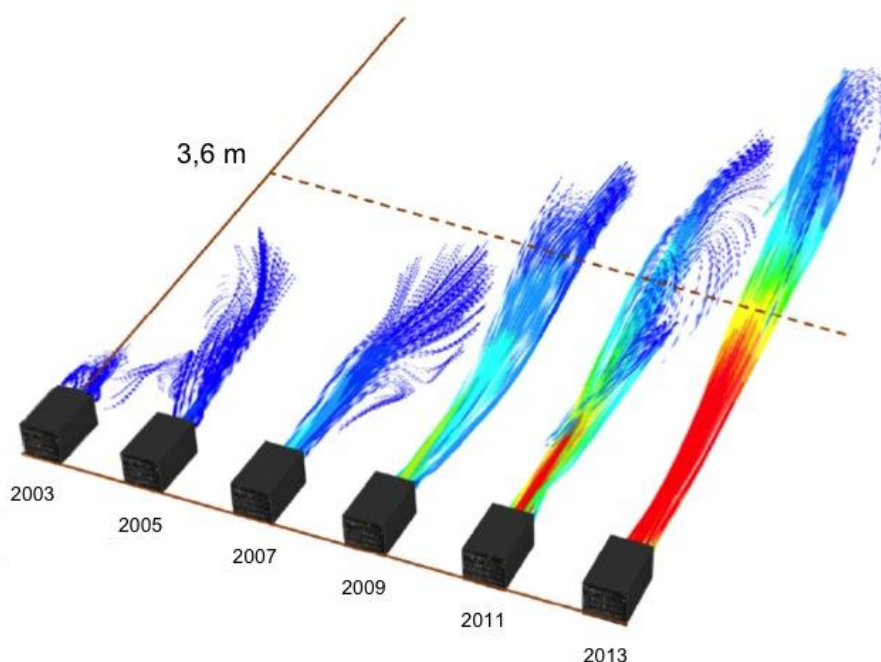


Figura 2.6. Linha do tempo para a dissipação térmica dos ativos de TI.

Antigamente, os CPDs operavam a temperaturas bastante baixas que giravam entre 17° e 20° C. Isso era devido às características dos equipamentos que eram instalados naqueles ambientes, os já citados *mainframes*.

De acordo com a Classe 1 da ASHRAE, a temperatura na entrada de ar dos equipamentos críticos de TI deve estar entre 18° e 27° C com uma umidade relativa do ar entre 40 e 55%. A saída de ar quente desses equipamentos deve estar a uma temperatura aproximada de 38° C com umidade relativa do ar em 20%. A saída o ar frio das unidades de climatização deve estar entre 13 e 16° C, com umidade relativa do ar em 90% (ASHRAE, 2011).

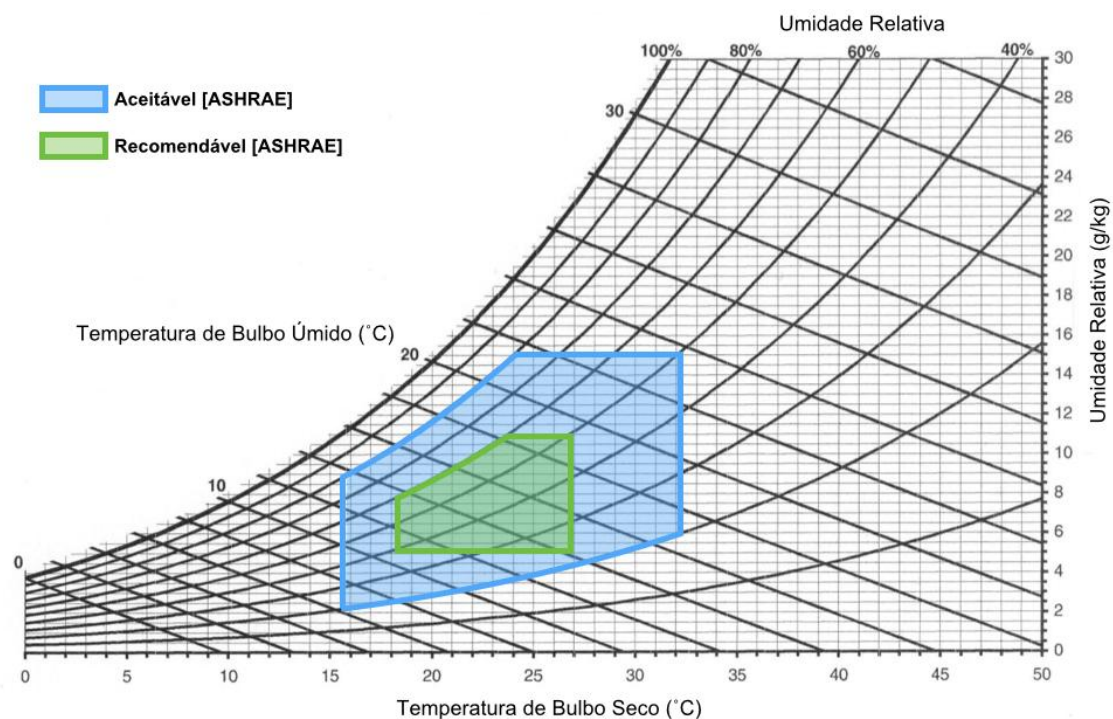


Figura 2.7. Gráfico psicrométrico - limites operacionais da ASHRAE.

2.6.1 Disposição do Ambiente

A grande maioria dos sistemas de distribuição do ar condicionado para Data Centers críticos utilizam a filosofia de insuflamento pelo piso elevado, formando o chamado *plenum*. Conforme ainda será descrito mais adiante, nessa configuração, não há necessidade de rede de dutos para a injeção de ar frio no ambiente uma vez que o ar refrigerado pelos condicionadores é insuflado diretamente abaixo do piso do Data Center. Como a absorção de ar frio nos equipamentos de TI se dá, na grande maioria dos casos, pela parte frontal dos equipamentos, o calor dissipado pelos circuitos eletrônicos desses dispositivos sairá, nos mesmos casos, pela sua parte traseira.

Assim, o posicionamento dos racks no interior do ambiente deverá ser realizado de forma que todos os racks de uma mesma fileira permaneçam de frente para a parte dianteira de todos os racks da fileira seguinte. Assim, esse corredor deverá receber ar frio para refrigerar os equipamentos, sendo denominado “corredor frio”.

O corredor onde todos os servidores e demais equipamentos de TI despejam calor é denominado “corredor quente”, o fluxo de ar aquecido do corredor quente deve retornar aos condicionadores de ar pela parte de cima dos gabinetes. Uma nova troca de calor é processada e o ar, que agora é frio, torna a ser insuflado sob o piso falso. A Figura 2.8 demonstra esquematicamente o fluxo de ar nos corredores quentes e frios de um Data Center com insuflamento pelo piso.

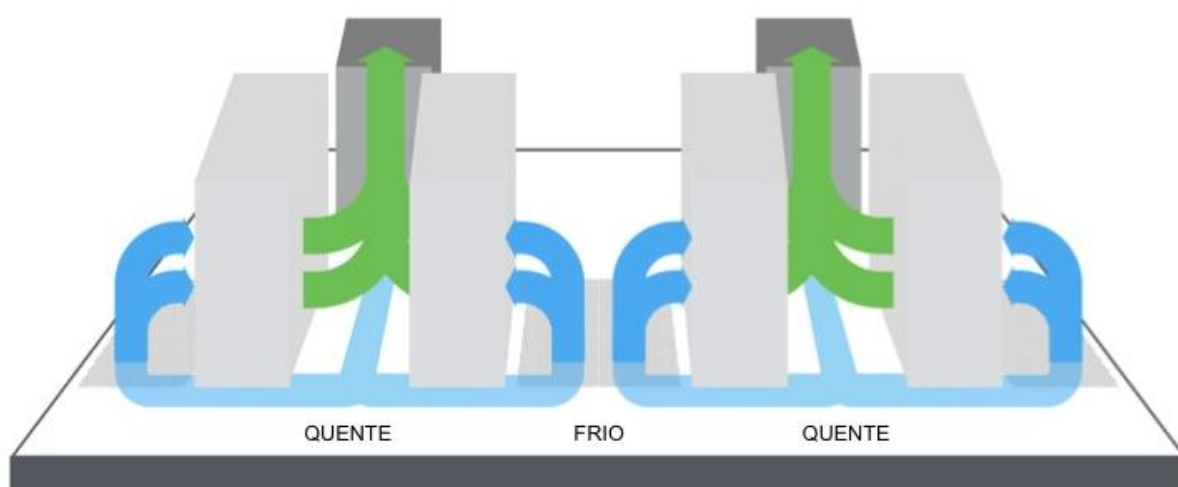


Figura 2.8. Disposição dos corredores frios e quentes.

2.6.2 Arquiteturas de Climatização

Há várias arquiteturas diferentes e possíveis para a climatização do ambiente de TI, que vão desde a arquitetura convencional utilizando unidades CRAC (*Computer Room Air Conditioning*) e o conceito de corredores frios e quentes até sistemas de climatização dedicados aos gabinetes que abrigam os equipamentos críticos de TI.

Para que a condução do fluxo de ar forçado seja possível nos casos de evaporadoras externas ao ambiente de TI, utiliza-se um sistema de dutos de ar. Os dutos serão denominados “dutos de insuflamento” quando conduzirem o ar refrigerado dos condicionadores de ar ao ambiente. E “dutos de retorno” quando trazem o ar do ambiente a refrigerar até as salas dos condicionadores de ar.



Figura 2.9. Dutos de climatização (EIA, 2013).

Os dutos comumente utilizados em ambientes de TI e telecomunicações são fabricados em chapas dobradas de zinco, existem ainda os outros tipos de dutos, como os: pré-formados, flexíveis, de alumínio, de chapa galvanizada e em chapa inox. Além dos dutos, o sistema de distribuição de ar também é formado por alguns outros elementos como: grelhas, *dampers* de controle, difusores para direcionamento de ar, cotovelos, curvas, reduções de seção, registros e venezianas. Cada um desses componentes constitui uma resistência extra ao escoamento do fluxo de ar. Esses fatores devem ser considerados na determinação do tamanho e potência do ventilador e respectivo motor elétrico.

Insuflamento Superior

Essa arquitetura de distribuição de ar no ambiente de TI é uma boa opção quando não se utiliza piso elevado, mas exige utilização de equipamentos adequados. A chamada distribuição de ar *overhead* deve ser dimensionada para insuflar o ar refrigerado diretamente no corredor frio pela parte superior do corredor. O ar quente resultante da climatização dos equipamentos de TI forma os corredores quentes, nos quais devem ser posicionados os exaustores para a retirada do ar quente do ambiente.

A climatização *overhead* também pode ser obtida com o uso de dutos para a insuflação de ar frio no ambiente com o retorno feito pelo coletor frontal da máquina. Abaixo pode-se notar um exemplo de insuflamento superior por dutos, de seção circular.



Figura 2.10. Insuflamento superior (Блог компании King Servers, 2013).

Insuflamento Inferior

A distribuição de ar sob o piso elevado é a técnica mais comumente adotada para Data Centers. Essa arquitetura de climatização oferece certa flexibilidade na distribuição da carga térmica, bem como no posicionamento das unidades de ar condicionado dentro do ambiente de TI. Em relação à arquitetura *overhead* convencional, a distribuição sob o piso não requer um sistema de dutos para a exaustão do ar quente do ambiente; o próprio ambiente é usado para esse fim.

Em sistemas de climatização que utilizam o piso elevado como duto, o vão livre é fator crítico e deve ser levado em consideração nas etapas de projeto e implementação. É importante considerar que vários sistemas de um Data Center compartilham o espaço sob o piso elevado tais como a distribuição de cabeamento estruturado e elétrico, os sistemas de dutos de água ou refrigerante, sistemas de segurança, entre outros. Se as saídas de ar forem obstruídas ou parcialmente bloqueadas devido à grande quantidade de cabos e dutos sob o piso, a climatização do ambiente de TI será prejudicada e os equipamentos críticos de TI poderão operar em condições críticas de temperatura e estarão mais sujeitos a falhas.

Uma boa prática adotada em sistemas de insuflamento pelo piso é fazer com que a distribuição das grelhas de alimentação elétrica seja feita abaixo das placas perfuradas do piso elevado, por onde fluirá o ar frio, de forma a impedir o superaquecimento dos cabos.

2.6.3 Sistemas Suplementares

Essa arquitetura de climatização também é conhecida como arquitetura mista, ou seja, além do uso das climatizadoras usuais, outros sistemas são utilizados em conjunto para melhorar a eficiência. Os

sistemas suplementares são normalmente obtidos com o uso de módulos de climatização *overhead* ou racks refrigerados diretamente pela passagem de um líquido refrigerante. Outros sistemas suplementares também podem ser usados (Marin, 2011).



Figura 2.11. Sistema suplementar de climatização (Datacenter Dynamics, 2013).

O equipamento mostrado na Figura 2.11 tem dois exaustores e um ventilador. Os exaustores coletam o ar quente proveniente dos corredores quentes e o ventilador insufla o ar frio nos corredores frios. Quando esse equipamento é utilizado em um sistema suplementar de climatização, ele tem a finalidade de oferecer uma climatização adicional àquela existente no ambiente. A Figura 2.12 mostra a forma de implementação de um sistema suplementar como esse.



Figura 2.12. Sistema suplementar de climatização.

Há também sistemas suplementares de climatização que são projetados para serem instalados verticalmente entre os racks ou gabinetes. Esses sistemas operam de forma similar àqueles instalados sobre os racks ou corredores frios e são também usados em conjunto com o conceito de corredores frios e quentes. Esses equipamentos coletam o ar quente da saída dos racks e insuflam ar frio nas entradas dos mesmos nos corredores frios.

Vale salientar que para o correto funcionamento do sistema de climatização, os racks nos quais serão instalados os ativos de TI devem permitir a circulação de ar através deles por perfurações frontais, traseiras e também em sua parte superior.

2.6.4 Insuflamento Confinado

Existe ainda uma variação na configuração de insuflamento pelo piso, dito insuflamento confinado. Esse sistema de insuflamento é projetado para isolar termicamente os corredores frios dos corredores quentes por meio do enclausuramento do corredor frio. Tal recurso é possível com a instalação de paredes feitas em acrílico ou outro material leve que possa ser remanejado com facilidade. Também é necessária a instalação de portas para acesso ao corredor frio. Além do enclausuramento dos corredores frios, o insuflamento e o retorno podem ser melhorados mediante a instalação de um forro falso provido de grelhas de retorno. O esquema da Figura 2.13 demonstra o sistema de insuflamento confinado (Chagas, 2014).

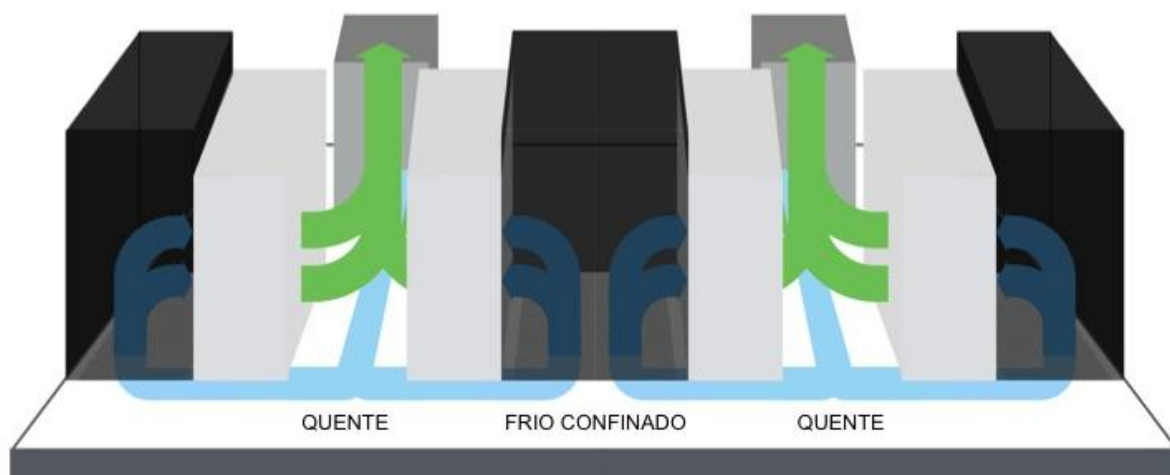


Figura 2.13. Enclausuramento dos corredores frios.

Fato é que independentemente da finalidade de atuação do Data Center, ele pode ser classificado primordialmente por suas características de disponibilidade, capacidade e eficiência. Por se tratar de ambientes de missão crítica, os Data Centers devem estar aptos a operar com níveis de disponibilidade

próximos de cem por cento, o que significa uma garantia de operação ininterrupta mesmo em casos adversos.

Para a garantia desses níveis de disponibilidade, os Data Centers devem contar com sistemas redundantes capazes de suprir a falta dos principais em casos de falha ou paradas, seja por motivos conhecidos, como manutenção preventiva e testes programados, ou desconhecidos, como erros humanos ou falhas de operação de modo geral.

2.7 BOAS PRÁTICAS

A queixa mais comum durante a vida útil de um Data Center é a alta temperatura na entrada dos equipamentos de TI por baixa capacidade de climatização. Porém, na maioria dos casos, o aquecimento não é definido pela baixa capacidade do sistema, e sim pela má gestão do fluxo de ar dentro do ambiente.

Para melhor desempenho do sistema de climatização, é importante que algumas práticas de instalação sejam seguidas. As aberturas deixadas nos racks causam a recirculação de ar quente pelo corredor frio, reduzindo a eficiência do sistema. Neste caso o fluxo de ar em exaustão de um determinado equipamento de TI é usado de forma cíclica para uma nova refrigeração, conforme a Figura 2.14.

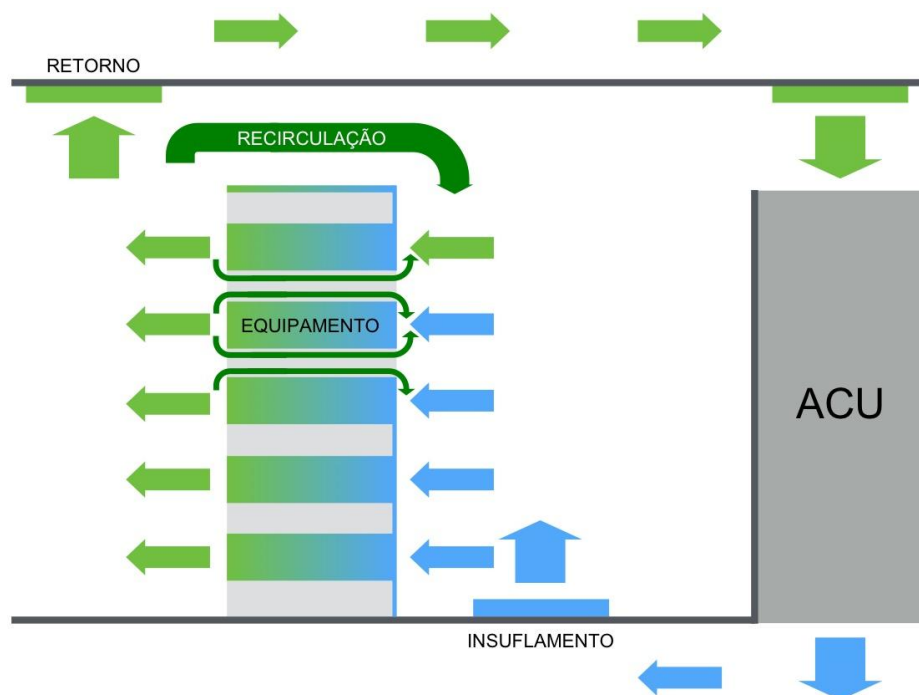


Figura 2.14. Recirculação.

Este processo é extremamente danoso à eficiência do sistema de climatização porque são criadas zonas de ar quente, ou *hot spots*, que tendem a aquecer os ativos de TI acima dos limites pré-estabelecidos e, conseqüentemente, exigem mais das climatizadoras.

Dentre as mais importantes boas práticas, o ato de selar todas as aberturas de entrada e passagem de cabos entre os racks e entre a infraestrutura de cabeamento sob o piso elevado e os racks, evita o vazamento de ar para fora do corredor frio. Esses vazamentos causam perdas de pressão abaixo do piso e podem caracterizar os chamados *by-pass*, ou curto circuitos.

O *by-pass* ocorre quando o fluxo de ar retorna à climatizadora antes mesmo de trocar calor com os ativos de TI, conforme a Figura 2.15.

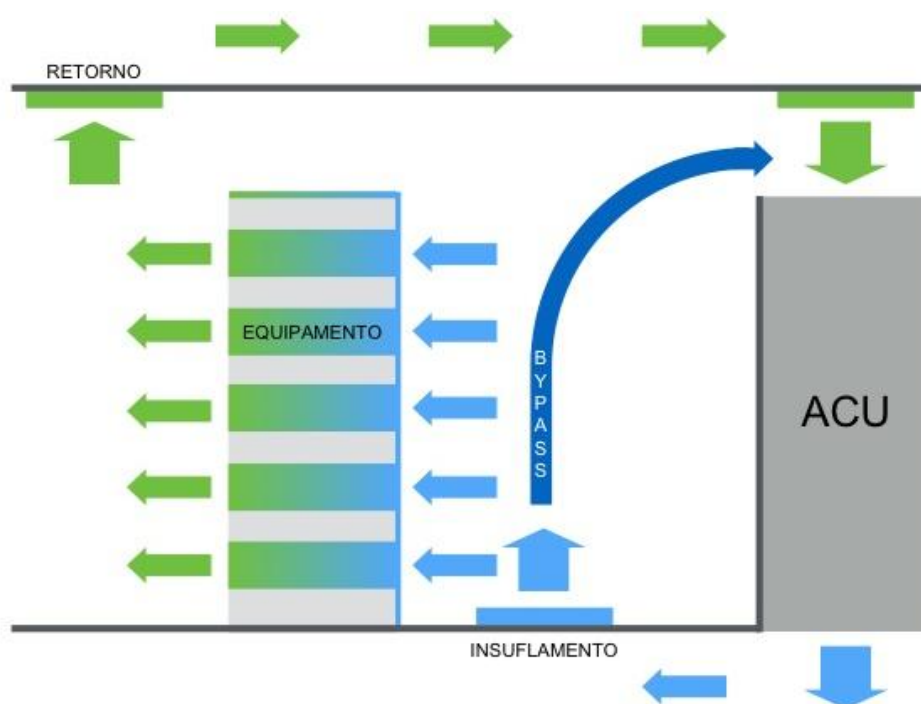


Figura 2.15. By-pass.

O dano por esse tipo de problema é ainda mais sério. Enquanto que no caso da recirculação o sistema torna-se ineficiente mas ainda supre a demanda dos ativos, em casos de *by-pass* a climatizadora recebe o ar de retorno à baixa temperatura, interpreta (erroneamente) uma baixa demanda e reduz os compressores, superaquecendo o ambiente.

Ainda pode-se citar duas outras formas de aplicação de boas práticas, que seriam a utilização de escovas para vedar os furos de passagem de cabos e espumas para todo e qualquer orifício em que se deseja interromper o fluxo de ar.

2.8 FRAGMENTAÇÕES DE RECURSOS

Quando o ambiente já se encontra em operação, é comum que sejam tomadas decisões que contraponham ao projeto piloto, seja por um equipamento mais moderno não antes previsto, ou por mudanças estratégicas de operação. Fato é que, independentemente da causa, a capacidade antes definida pela distribuição ideal de recursos ao longo do ambiente passa a ser comprometida, se aplica então o conceito de fragmentação de recursos.

A título de esclarecimento do conceito de fragmentação, imagine que o ambiente seja definido por seus potenciais de energia, climatização, espaço e rede, de acordo com os gráficos abaixo. Um projeto ideal de Data Center dimensiona os sistemas de alimentação de acordo com a demanda de TI imaginada, ou seja, projeta os sistemas para fornecer o potencial necessário para a demanda de TI de forma bem distribuída e sem desperdícios. Assim como sugere o primeiro gráfico ilustrativo, o consumo ao longo do ciclo de vida é linear e, ao final, todos os recursos se esgotam.

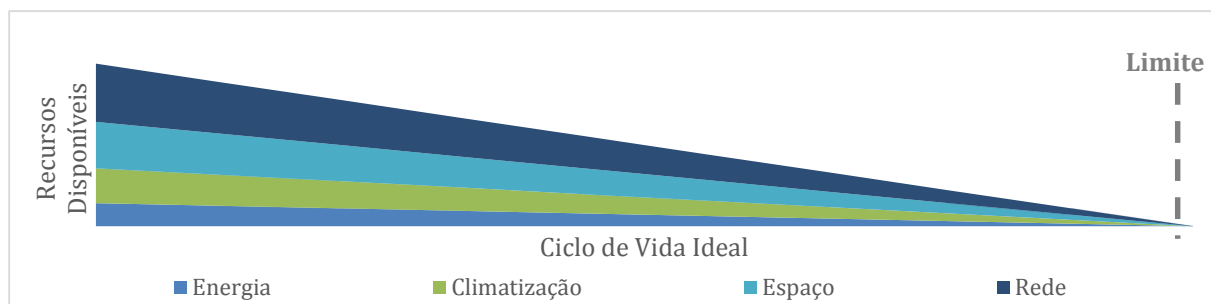


Figura 2.16. Consumo de recursos em um ciclo de vida ideal.

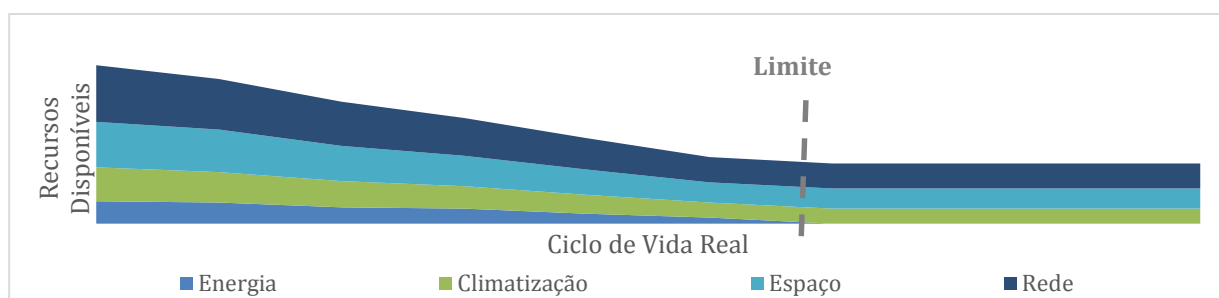


Figura 2.17. Consumo de recursos em um ciclo de vida real.

Mas a partir do momento em que esse projeto conceitual não é obedecido, por qualquer que seja o motivo, o consumo dos potenciais passa a ocorrer de forma desbalanceada, resultando na escassez precoce de um dos recursos. Energia, no caso do segundo gráfico ilustrativo.

Portanto, as fragmentações de forma geral podem ser definidas como sendo todos os recursos os quais deixaram de ser consumidos por impossibilidade do ambiente, limitado pelo recurso mais escasso.

3 ANÁLISE AMBIENTAL

O capítulo 3 deste trabalho apresenta diversos conceitos e metodologias para a análise ambiental do Data Centers, provendo meios de comparação e otimização do sistema de distribuição de ar com base nos resultados de uma análise numérica.

3.1 CLASSIFICAÇÃO

Para uma boa análise ambiental deve-se ter em mente três parâmetros de desempenho, sendo eles: A disponibilidade do sistema de TI, a qual deve ser garantida mesmo em caso de falhas ou desligamento programado do sistema de climatização; o quanto de capacidade está disponível para o uso ou expansão, levando-se em conta os recursos de espaço, energia elétrica e climatização; e o quão eficiente é realizada a distribuição de ar ao longo do Data Center.

3.1.1 Disponibilidade

A disponibilidade de um determinado sistema de climatização está diretamente relacionada à redundância e é geralmente definida pelo conceito de carga operacional em caso de falha ou desligamento planejado. Ela pode ser quantificada pela razão entre o somatório das cargas elétricas dos equipamentos de TI ainda em condições operacionais, pela carga de TI total do ambiente. O resultado nada mais é que um valor expresso pela equação a seguir:

$$Disponibilidade = \frac{CEO}{CTE} = \frac{Carga\ de\ Equipamentos\ Operacionais}{Carga\ Total\ de\ Equipamentos} . \quad (1)$$

Para que um equipamento possa ser classificado como operacional, o seu meio de atuação deve estar dentro dos limites de temperatura e umidade aceitáveis e pré-estabelecidos pela ASHRAE que, no caso negativo, passa a ser chamado de não-operacional.

Para sistemas altamente disponíveis, o valor da disponibilidade deve estar muito próximo do valor unitário, ou cem por cento, isso implica que a funcionalidade da carga de TI está resguardada pela redundância dos sistemas, sendo eles elétrico ou de climatização.

3.1.2 Capacidade

Um Data Center tradicional costuma ser concebido em projeto tendo-se como base o planejamento estratégico do usuário para os próximos cinco anos, dez no máximo, quando o operador se vê na necessidade de realizar obras de expansão ou melhorias de performance. Essas necessidades são

definidas pela capacidade máxima do ambiente (limitada pelo recurso mais escasso) que, uma vez alcançada, passa a limitar a expansão do negócio.

Sendo assim, a definição da capacidade máxima de um Data Center pode ser feita por meio de uma comparação ao projeto conceitual. Para a análise, aumenta-se de forma gradual a carga térmica do ambiente, até que algum dos equipamentos se superaqueça, determinando o limite de carga da sala. Seu valor pode ser quantificado pela expressão:

$$Capacidade = \frac{CMS}{CMP} = \frac{Carga\ Máxima\ Suportada}{Carga\ Máxima\ de\ Projeto} . \quad (2)$$

3.1.3 Eficiência

Existem diversas maneiras e metodologias de se determinar a eficiência energética de um sistema de climatização que, apesar de terem o mesmo objetivo, cada metodologia possui uma abordagem diferente a qual pode tornar a sua utilização mais conveniente de acordo com o escopo do trabalho.

Do inglês, *coefficient of performance*, o COP é um parâmetro fundamental na análise dos sistemas de climatização. Ele expõe como resultado a taxa de eficiência na retirada de calor da evaporadora em razão do trabalho realizado pelo compressor.

O mesmo pode ser calculado da seguinte maneira:

$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{W}_c} . \quad (3)$$

Apesar dessa metodologia é bastante difundida para a determinação da performance do equipamento de climatização propriamente dito, ela não é sensível às formas de distribuição e gerenciamento do ar ao longo do ambiente de TI, o que exige uma metodologia elaborada para esse fim.

O fluxo de ar mínimo em um Data Center para a troca de calor com os ativos de TI pode ser calculado pela aplicação da seguinte equação:

$$Vazão = \frac{Q}{1,21 \cdot (\Delta T)} , \quad (4)$$

onde Q é a quantidade de calor a ser removido, em quilowatts, e ΔT a diferença entre as temperaturas inicial e final (ao passar pelo equipamento), em graus Celsius. O valor de 1,21 adotado é oriundo do produto entre a densidade do ar e seu calor específico nas condições ambientais de temperatura e pressão (Pimenta, 2013).

Segundo o trabalho publicado por Niemann, a vazão aplicada pelos ventiladores em ambiente de climatização pode ser definida, com uma pequena taxa de erro, como sendo a vazão de refrigeração dos ativos de TI mais as perdas por vazamentos. Ainda nele, o autor também afirma que os índices de vazamentos de ar em ambientes não confinados e disposição por corredores costumam girar entre 25 e 50% de acordo com as características do ambiente, e em ambientes confinados, algo entre 3 e 10% (Niemann, et al., 2011).

Sendo assim, as vazões podem ser definidas pela equação:

$$Vazão\ Real = \frac{Vazão\ de\ TI}{(1-i)} , \quad (5)$$

onde i é o índice de vazamentos. A critério de aproximação, adota-se para as taxas de vazamentos em casos de não confinamento e com confinamento de 30 e 4,5%, respectivamente.

O consumo do sistema de climatização aplicado ao ambiente de TI é dado por basicamente dois componentes: o ventilador e o compressor, sendo uma aproximação extremamente plausível dizer que esse consumo é igualmente dividido pelos dois componentes.

Porém esse consumo não é estático. O consumo do ventilador está diretamente acoplado à vazão real de insuflamento, ou seja, ao se reduzir a vazão (por uma otimização de performance, por exemplo) o consumo é reduzido. A potência reduzida do ventilador pode ser aproximada pela equação:

$$Pv_{final} = Pv_{inicial} \cdot (1 - i)^{0,4} . \quad (6)$$

O consumo do compressor também é sensível à redução de operação, porém sob outro parâmetro, a variação de temperatura. Uma vez que os sensores de temperatura dessas máquinas são posicionados no retorno, a medida em que o *setpoint* é aumentado, o gasto frigorígeno para a climatização também é reduzido. A potência reduzida neste caso aproxima-se por:

$$Pc_{final} = Pc_{inicial} \cdot 0,971^{\frac{\Delta T}{0,56}} . \quad (7)$$

Por fim, com ambas as novas potências determinadas, pode-se mensurar a potência de climatização do ambiente como sendo a sua composição que, quando somada ao consumo de TI, representa aproximadamente o consumo total do ambiente.

$$P_{ar\ cond.} = P_{v_{final}} + P_{c_{final}} \quad . \quad (8)$$

$$P_{total} = P_{ar\ cond.} + P_{TI} \quad . \quad (9)$$

Índice de Eficiência

Com sua sigla derivada do inglês, *Data Center Infrastructure Efficiency*, o DCIE é uma metodologia que visa mensurar o quão eficiente no uso de energia é o Data Center, colocando em evidência a quantidade de energia que é gasta para garantir o funcionamento dos equipamentos de TI. Ele nada mais é que uma razão entre a quantidade de energia usada pelos ativos de TI pelo total de consumido no ambiente, podendo ser calculado da seguinte maneira:

$$DCIE = \frac{CE}{CTA} = \frac{Carga\ dos\ Equipamentos\ de\ TI}{Carga\ Total\ do\ Ambiente} \quad . \quad (10)$$

Esta metodologia, desenvolvida pela *The Green Grid*, e é o inverso da metodologia PUE, *Power Usage Efficiency*, e possui como unitário o valor ideal.

A metodologia a ser utilizada neste trabalho é muito próxima à essa, mas com uma pequena modificação: ao lugar de se considerar a carga total do ambiente, considera-se a carga de TI mais a de climatização apenas. Essa atitude faz com que o cálculo não seja influenciado pela eficiência da distribuição elétrica do ambiente.

$$Eficiência = \frac{CE}{CTI+C} = \frac{Carga\ dos\ Equipamntos\ de\ TI}{Carga\ de\ TI+Climatização} \quad . \quad (11)$$

3.2 FERRAMENTAS DE ANÁLISE

Para conseguir mensurar esses parâmetros, além de ser preciso coletar uma série de dados físicos do ambiente por meio de equipamentos (como analisadores de energia, balômetros, termômetros, anemômetros, dentre outros), é de suma importância a utilização de alguma ferramenta de análise numérica que permita prever as consequências das possíveis modificações no Data Center, pois, somente assim, é possível mensurar os índices de disponibilidade, capacidade e eficiência sem interferir de forma direta no funcionamento do ambiente.

3.2.1 Métodos Numéricos

A metodologia numérica abordada neste trabalho é a Fluidodinâmica Computacional. Normalmente abreviada como CFD (do inglês “*Computational Fluid Dynamics*”), esta é uma ferramenta do campo da mecânica que utiliza a teoria do contínuo como fundamentação para a discretização do meio fluido. Esta discretização é definida pelo elemento representativo de volume, de dimensões mínimas, no qual uma propriedade ou quantidade física se mantém sob um valor médio. Dessa forma, este elemento é o menor volume do meio fluido em que as propriedades são mantidas (Harlow, 2004).

Sendo assim, os elementos representativos compõem o espaço no qual a ferramenta utiliza métodos numéricos e algoritmos para resolver problemas que envolvem escoamentos. Ela baseia-se no cálculo iterativo de equações que descrevem o comportamento de líquidos e gases em domínios definidos por condições de contorno.

Essa metodologia de resolução de problemas foi desenvolvida na década de 60 para atender às demandas das indústrias aeronáutica e aeroespacial, pois permite simular o comportamento de escoamentos complexos, muitas vezes impossíveis ou economicamente inviáveis de serem reproduzidas em laboratório.

Com o desenvolvimento e popularização da computação, na década de 80 o CFD passou a ser utilizado por diversas indústrias, incluindo a de refrigeração de componentes eletrônicos. Com o tempo, os softwares tornaram-se mais acessíveis e passaram a ser otimizados para atender a demandas cada vez mais específicas, surgindo, por volta do ano 2000, aplicações voltadas exclusivamente para Data Centers.

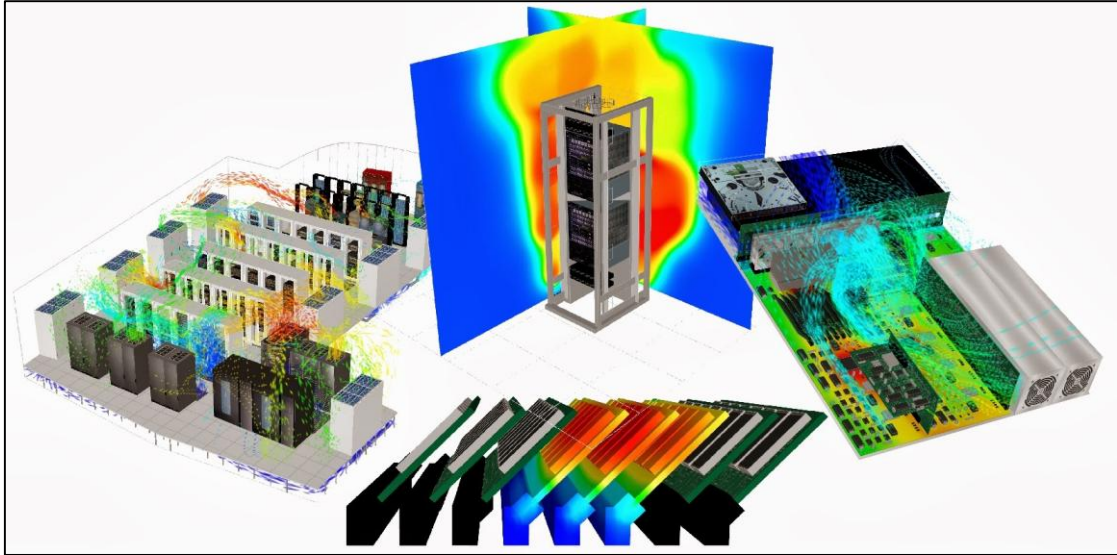


Figura 3.1. Ferramenta de CFD aplicada à Data Centers.

3.2.2 Modelagem Numérica

Fazendo uma breve introdução ao sistema modelagem numérica aplicada à ferramentas como o CFD, podemos definir as equações de Navier Stokes como as equações que descrevem o movimento das substâncias fluidas. Elas estabelecem que as mudanças no momento e aceleração de uma partícula fluida são simplesmente um produto resultante das mudanças de pressão e forças viscosas dissipativas.

$$\frac{Dp}{Dt} + \rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 , \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} , \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho e_t) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i e_t) = -\frac{\partial p}{\partial x_i}(p u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} u_i) + \frac{\partial q_i}{\partial x_i} , \quad (14)$$

Estas equações são obtidas de princípios básicos de conservação da massa, quantidade de movimento e energia, respectivamente. Como todo escoamento turbulento é tridimensional e transiente, estas equações não-lineares geram um custo computacional muito grande para serem resolvidas levando-se em consideração todas as escalas presentes, sendo então necessária a simplificação destas por meio de algum modelo adequado. O empregado à este problema é o baseado na decomposição de Reynolds, chamado média de Reynolds (RANS).

O modelo de turbulência empregado nesta solução é o k-épsilon, um modelo de duas equações baseado na viscosidade turbulenta (idealização conhecida como hipótese de Boussinesq). Este modelo apresenta duas equações de transporte modeladas separadamente, que são resolvidas, uma para energia

cinética e outra para o termo de dissipação da energia cinética, considerando que os tensores de Reynolds são proporcionais aos gradientes de velocidade média.

A escolha deste modelo de turbulência foi embasada primeiramente ao fato de que o mesmo se trata de um modelo clássico, com uma carga de estudo muito grande e permite o confronto dos resultados de acordo com suas conhecidas deficiências. Naturalmente, este modelo não é o ideal para descrever de forma precisa o comportamento em regiões sob a camada limite, apresentando como resposta valores de perdas de carga levemente superiores à realidade, impactando em uma subestimação nos resultados de vazões e, conseqüentemente, trocas de calor. Porém, dado ao escopo da análise numérica, levou-se em consideração o fato de que essa característica se encaixa como conservadora e que a modelagem da camada limite é pouco representativa ao resultado, sendo os valores potenciais muito mais expressivos, portanto, o modelo atende muito bem às expectativas propostas.

Por se tratar de um estudo no qual a transferência de calor é o ponto chave, deve-se contabilizar as trocas de calor resultantes do escoamento, o qual possui um caráter tridimensional, incompressível, permanente e turbulento.

Um outro ponto importante que define as condições de contorno é o caráter adiabático das paredes do Data Center. Essa aproximação pode ser dada pelo fato de que o modelo em questão é uma sala cofre e possui painéis com grande capacidade de resistência térmica.

3.2.3 Estratégia de Aplicação

Ao longo da leitura das Sessões 1.3 e 1.4 deste projeto de graduação, foi deixado claro quais são os objetivos e com base em que ferramenta planejamos alcançá-los. Porém, a fim de deixar ainda mais claro o processo da análise numérica, subdividiu-se a metodologia de aplicação em quatro fases subsequentes:

Fase 1 – Modelo Base

Nesta fase inicial é elaborado um modelo base do Data Center com um alto detalhamento estrutural, procurando definir da melhor forma possível todos os componentes ambiente.

Fase 2 – Estudo de Malha

Ao final do modelo base deve ser desenvolvido um estudo de malha a fim de compreender a resposta do modelo e definir o grau de refinamento que melhor discretiza o domínio, levando-se em consideração os parâmetros de resposta e o custo computacional.

Fase 3 – Instrumentação do Ambiente Real

Neste momento são utilizados equipamentos para a coleta de informações de operação do Data Center como um todo, dentre eles encontram-se: analisador de energia para o real consumo elétrico de

cada um dos circuitos; balômetro para a coleta de vazão em cada placa perfurada e retorno de ar condicionado; termógrafo para o campo de temperatura nas superfícies de entrada e saída dos racks; e dezenas de sensores pontuais de temperatura espalhados ao longo do ambiente.

Fase 4 – Refinamento do Modelo

Uma provável ocorrência é a discrepância entre os resultados da simulação do modelo base e os dados coletados em campo. Sendo assim, nesta fase é realizado um refinamento no modelo base, onde modifica-se os parâmetros de operação dos diversos equipamentos instalados e refina-se a modelagem de dispositivos ou obstruções que possam estar mal representados.

Fase 5 – Análise de Estado e Melhorias

Alcançada a confiabilidade do modelo computacional, neste momento é elaborada toda a análise do ambiente, identificando as causas de cada perda de capacidade de performance e propondo soluções de melhorias.

4 MODELO BASE

Este capítulo visa a apresentação do Data Center real em que o estudo deve se embasar e, assim, desenvolver o modelo base de sua análise numérica.

4.1 CASO TESTE

Ao longo do ano dividiu-se o presente projeto em duas etapas, sendo elas o Caso Teste (estudo no qual serviria para o desenvolvimento e aprimoramento da capacidade de modelagem) e o agora Caso Real. Para a primeira etapa, foi criado um modelo teste a fim de se elaborar a metodologia de modelagem. Para isso desenvolveu-se um Data Center fictício capaz de representar uma sala cofre comum e de pequeno porte, com aproximadamente 15 metros quadrados de área, insuflamento por um *plenum* abaixo do piso elevado de 350 milímetros e saída por 12 placas perfuradas que alimentam o corredor frio. Além disso, a carga de TI máxima de projeto é da ordem de 20 kW e a climatização feita por uma máquina redundante com capacidade de retirada de calor sensível de 23 kW cada. O Anexo II encontra-se uma tabela resumo com todas as principais características de operação do ambiente

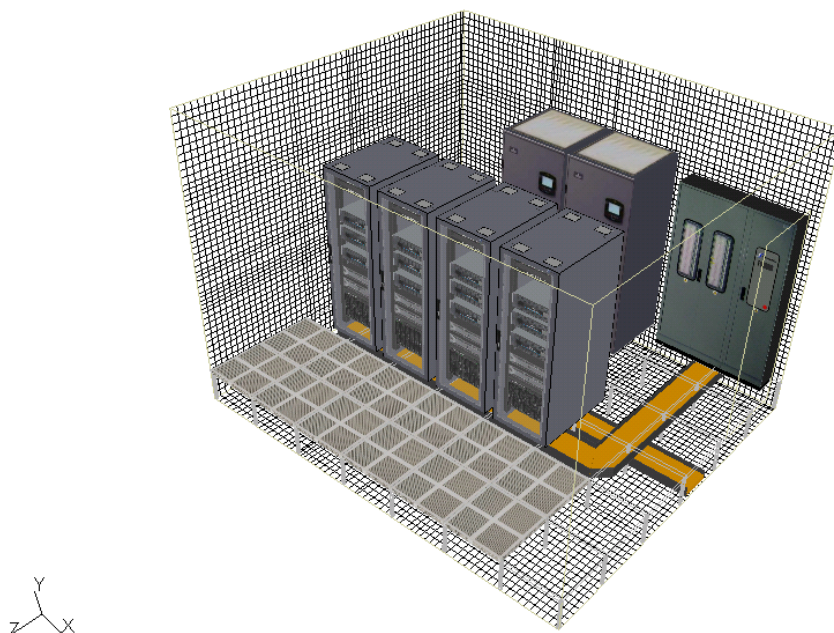


Figura 4.1. Modelo teste.

Ao final foi elaborada uma análise onde foram alcançados todos os objetivos propostos que, devido ao sucesso, deram margem e segurança para a realização de um projeto ainda mais elaborado, é foco tema desta etapa, o Caso Real.

4.2 CASO REAL

O modelo a ser apresentado neste projeto foi desenvolvido a partir de um Data Center governamental localizado nas mediações de Brasília, Distrito Federal. No Anexo III, ao final deste projeto, encontra-se uma tabela resumo com todas as principais características de operação do ambiente, entretanto, pode-se resumi-lo à uma sala cofre com aproximadamente 34 metros quadrados de área, disposição em corredor, insuflamento por um *plenum* abaixo do piso elevado de 340 milímetros e saída por 14 placas perfuradas que alimentam os corredores frios. A alimentação elétrica é redundantemente distribuída à 13 racks, nos quais são alocados 178 ativos de TI. A carga térmica do ambiente é de aproximadamente 48,1 kW, e é conduzida ao meio externo por três conjuntos de expansão direta com 23 kW de capacidade de calor sensível cada.

A partir deste momento, será adotada uma lógica cartesiana para a identificação no posicionamento de cada componente que exija ser referenciado. A escolha das referências não é arbitrária, uma vez que ela já é empregada e está em uso pela empresa.

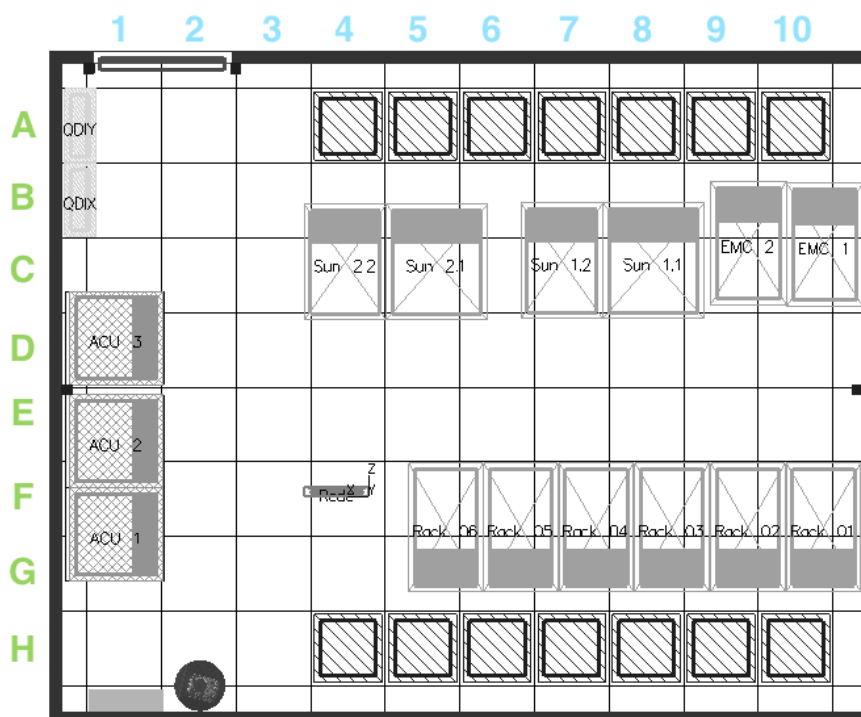


Figura 4.2. Mapa de referências.

Em conjunto com o anexo supracitado, encontram-se também, ao final do trabalho, algumas plantas baixas características do ambiente, nelas estão evidenciadas as decisões de projeto quanto às disposições de cada sistema – Anexo XI.

4.3 MODELAGEM

A modelagem para a análise numérica inicia-se com a criação do modelo tridimensional do domínio que se deseja analisar. Nesse modelo base, são definidas todas as superfícies, objetos e variáveis que contribuem com o comportamento do escoamento, além das equações de movimento e conservação de massa e energia. Quanto maior o nível de detalhamento e acurácia durante a modelagem, mais precisa será a simulação e menor será o trabalho de refinamento do modelo (Fase 4). A modelagem é feita por meio de um software comercial, 6Sigma.

4.3.1 Equipamentos de TI

Por uma mobilidade de acesso, os equipamentos de TI são divididos internamente de acordo com o seu escopo de utilização, sendo ele de armazenamento, processamento ou de rede. A Figura 4.3 auxilia na compreensão de suas disposições.

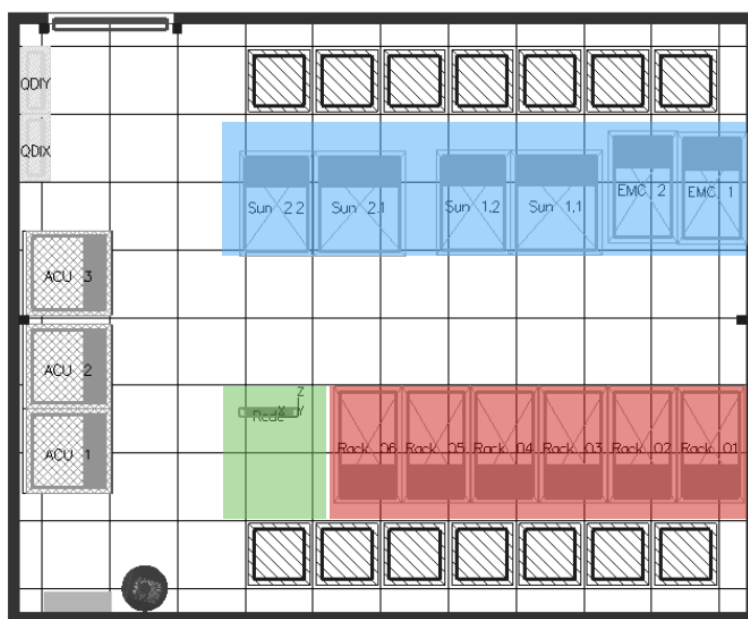


Figura 4.3. Disposição dos equipamentos de TI.

Como pode-se notar na imagem, os equipamentos de armazenamento de dados (também chamados de *storages*) foram agrupados em todo o corredor B, bloco azul. Esses racks são pré-moldados com equipamentos fixos e a sua decisão de projeto deve ter sido determinada pela otimização de espaço e consumo, pois uma única unidade de processamento gere todos os demais discos expansíveis ali alocados.

No corredor G estão alocados os servidores de processamento, bloco vermelho, divididos entre lâminas dispostas em *blades* de alta densidade e em servidores de slots tradicionais, e o rack de rede, bloco verde, ocupado basicamente por switches e *patch panels*.

Vale notar que alguns poucos equipamentos empregados nesta sala cofre, predominantemente servidores, não apresentam redundância em sua fonte de alimentação. Nestes casos, distribuídos ao longo das faixas de ambos os quadros, eles estão sujeitos queda de operação caso haja uma falha em uma das fontes.

Em sua modelagem, os ativos de TI são simplificados como sendo blocos com uma região de entrada (*inlet*), uma de saída (*outlet*) e quatro paredes (*wall*). A Figura 4.4 exemplifica as condições de fronteira.

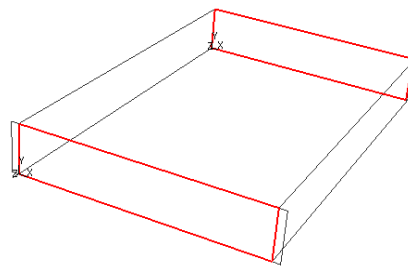


Figura 4.4. Domínio do Equipamento de TI.

Além das condições de fronteira mostradas acima, existem dois parâmetros físicos que também são definidos no modelo, a geração de calor e a vazão de ar pelo o qual esse calor é dissipado. Como já mencionado e explicado anteriormente, a geração de calor pode ser aproximada à potência de consumo elétrica definida pelo fabricante, porém, o comportamento da vazão é relativo e depende do gradiente de pressão calculado nas regiões de entrada e saída do fluxo de ar.

O problema é resolvido de acordo com a equação abaixo proposta pelo software de análise numérica. Segundo o memorial descritivo apresentado no “Help” do programa, a equação é resultado de uma aproximação por curvas experimentais.

$$\frac{dV}{dp} = \frac{2f \cdot A^2}{\rho \cdot V_o} , \quad (15)$$

onde, f é o coeficiente de incremento de fluxo, V_o a taxa de vazão definida nominalmente e A a área de passagem do fluxo. Observa-se da equação proposta que a dependência do gradiente de pressão é inversamente proporcional à vazão nominal do sistema de exaustão e diretamente às aberturas de entrada e saída do modelo.

No Anexo IV encontra-se uma tabela com o descritivo de todos os dispositivos atualmente empregados no Data Center, informando marca, modelo dimensões e posicionamento de cada um.

Ao final da modelagem dos ativos de TI, sob o critério puramente visual, são atribuídas imagens às regiões frontais e traseiras de cada equipamento.

4.3.2 Racks

Os racks de TI são itens muito elaborados, envolvendo a modelagem de sua estrutura física, dispositivos de ventilação (geralmente dispostos em sua parte superior) e de todo o aparato de obstrução por cabeamento.

Neste projeto, foram modelados basicamente quatro tipos distintos de racks, sendo eles um de rede, um de servidores e dois de armazenamento.

Rack de Rede

O rack de rede possui uma estrutura específica por ser projetado a fim de comportar equipamentos com uma grande quantidade de cabos, sendo as duas “torres” laterais dispositivos que funcionam como canaletas de acesso. Todas as suas fronteiras são superfícies de parede e, neste caso, o seu preenchimento é realizado por sete *patch panels* e um *switch*.

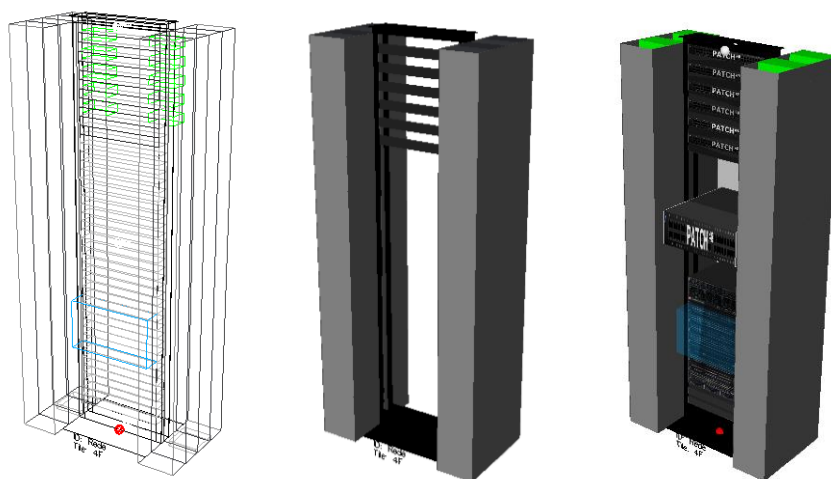


Figura 4.5. Estrutura do rack de rede G4.

Ao longo do ambiente real existem um grande número de corpos que influenciam o escoamento interno de ar, potencializando as perdas de carga do escoamento, onde pode-se citar o cabeamento de rede presente nas regiões traseiras dos racks. O modelamento dessas obstruções depende das propriedades físicas do corpo e suas disposições frente ao escoamento, sendo ele realizado por corpos

sólidos, permeáveis ou até mesmo uma composição de ambos, aproximando ao máximo as condições de escoamento e perda de carga imposta ao meio.

A Figura 4.6 exemplifica o modelamento dos cabos do rack de rede, eles foram modelados como sendo um bloco de permeabilidade de 40%. O valor é uma aproximação visual e deve ser redefinida de acordo com os resultados da instrumentação na fase três.

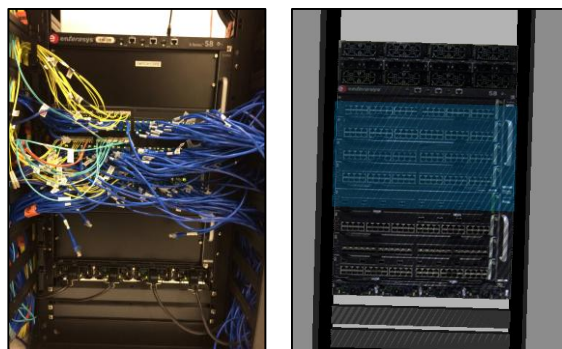


Figura 4.6. Obstrução do rack de rede G4.

Rack de Servidores

Os racks de servidores, apesar de possuírem um escopo e um formato completamente diferente do anterior, se assemelha em muito no processo de modelagem, diferenciando-se apenas na existência de portas e exaustores no topo.

As portas são originalmente superfícies com orifícios de cinco milímetros, espaçados em a cada três. Para o seu modelamento, devido a inviabilidade de se desenhar uma superfície tão detalhada, tomou-se uma superfície com uma permeabilidade semelhante à porção aberta.

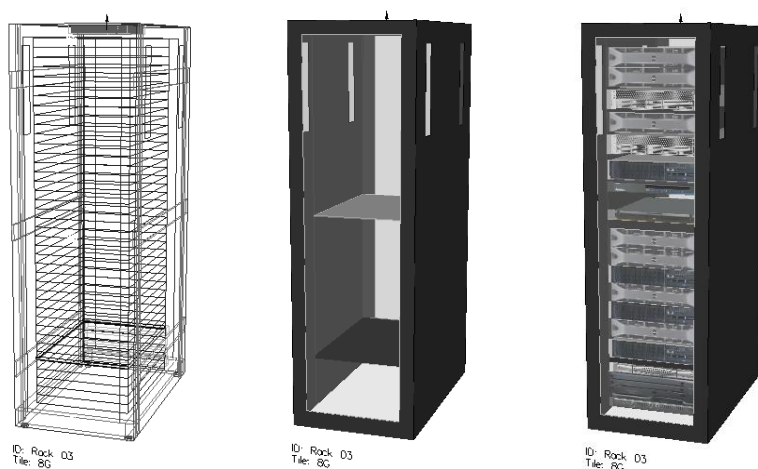


Figura 4.7. Estrutura do rack G8.

Os ventiladores localizados na porção superior de cada rack, Figura 4.8, foram modelados como blocos semelhantes aos equipamentos de TI, porém, vale ressaltar a sua baixa dissipação ao escoamento, 20 watts.

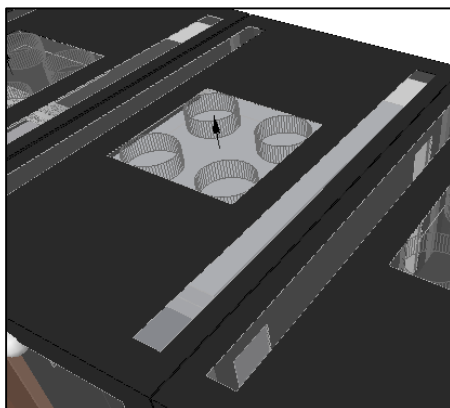


Figura 4.8. Ventiladores topo de rack.

Racks de Armazenamento

Para a modelagem dos racks de armazenamento foi utilizada a mesma metodologia dos anteriores. O resultado dos mesmo pode ser observado nas figuras a seguir:

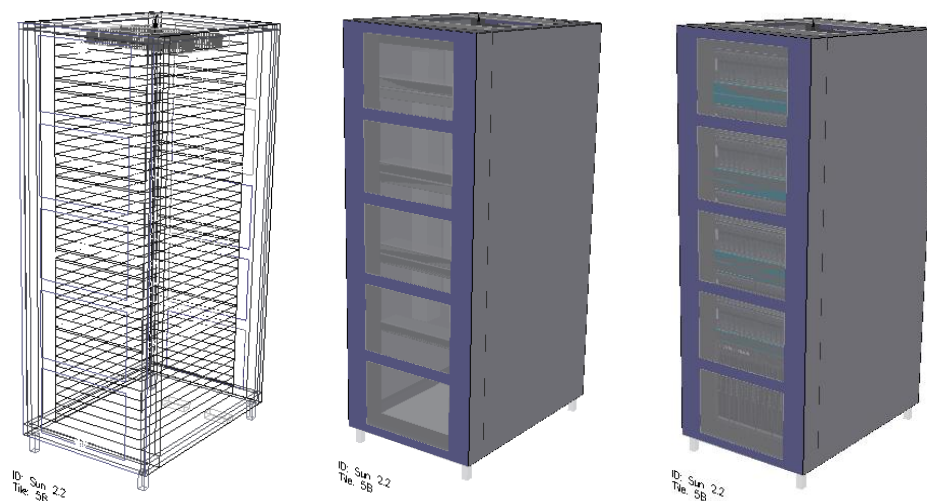


Figura 4.9. Estrutura do rack B8.

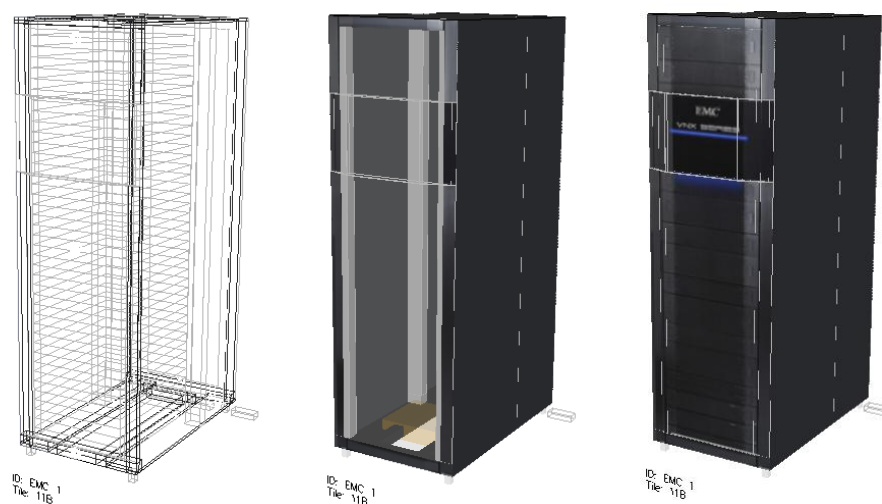


Figura 4.10. Estrutura do rack B10.

4.3.3 Ar Condicionado

O sistema de ar condicionado é composto por três circuitos frigorígenos independentes e de expansão direta. Embarcadas com o fluido refrigerante R-407, essas máquinas de precisão apresentam em sua individualidade uma capacidade de retirada de calor sensível do ambiente de aproximadamente 23 kW e são equipadas com dispositivos para controle de umidade.



Figura 4.11. Evaporadoras.

As evaporadoras, evidenciadas na Figura 4.11, possuem 1950 milímetros de altura por uma base quadrada de 750 milímetros, sendo fluxo de ar é admitido em sua porção superior e insuflado pela inferior. Neste sistema, os compressores estão alocados nas evaporadoras e o conjunto compressor-ventilador é responsável pela dissipação de aproximadamente 3 kW em cada uma das unidades (responsável por reduzir de 26 kW para 23 kW a capacidade já mencionada).

Os equipamentos possuem uma gerenciadora que permite a determinação de limites para temperatura de retorno e umidade relativa, as quais ditam o funcionamento dos compressores e da resistência elétrica. Neste caso, os limites aplicados às máquinas são de 20°C e 50%, respectivamente. Além disso, por meio desta gerenciadora é possível definir a redundância cíclica, ou seja, fazer com que o equipamento que está em redundância fique alternando para um desgaste uniforme e aumentar a vida útil dos equipamentos. Porém, esta função não se vê presente no Data Center uma vez que o sistema exige uma demanda de climatização maior do que duas máquinas são capazes de suprir.

A modelagem do equipamento de ar condicionado é muito semelhante ao de um equipamento de TI, diferenciando-se apenas no fluxo contrário de calor e nas condições de operação. No equipamento, também são definidas as condições de fronteira que, neste caso, apresenta o insuflamento (*outlet*) pelo piso e o retorno (*inlet*) em sua porção superior, as demais possuem características de parede (*wall*). A Figura 4.12 exemplifica as condições de fronteira supracitadas.

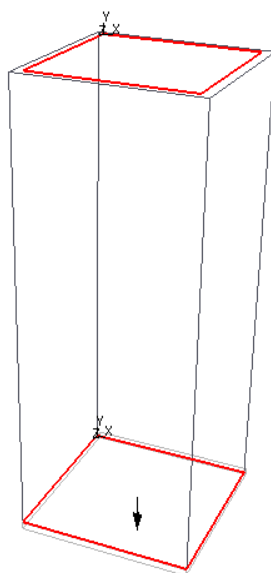


Figura 4.12. Domínio do equipamento de ar condicionado.

A vazão de ar não foi corrigida, como nos equipamentos de TI, porque o volume nominal de ar que passa por cada equipamento como este é relativamente alto, aproximadamente 5.600 metros cúbicos por hora, o que torna muito baixa a influência do gradiente de pressão, agora adverso.

De forma análoga ao que ocorre com os cabos nas regiões de exaustão dos equipamentos de TI, no sistema de climatização existem as tubulações de gás refrigerante, dreno e sistema de combate ao incêndio que se localizam logo abaixo do insuflamento e representam uma perda de carga considerável. Sendo assim, o seu modelamento é imprescindível e foi realizado como sendo cilindros de corpo rígido. A Figura 4.13 apresenta o modelo das tubulações.

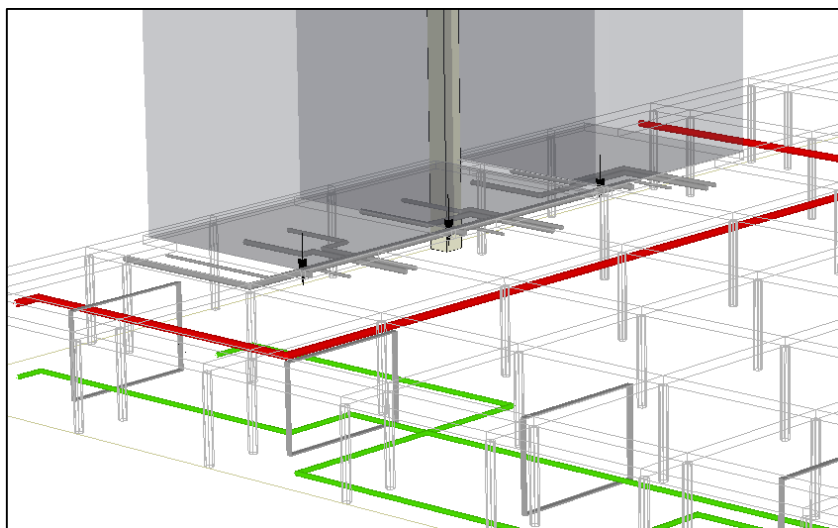


Figura 4.13. Tubulação do sistema de ar condicionado e combate ao incêndio.

4.3.4 Quadros de Distribuição

Os quadros de distribuição, QDX e QDY, são limitados pela capacidade de carga do nobreak, 40 kW, trifásicos, e preenchidos por disjuntores “sacáveis” que permitem a sua manipulação sem a necessidade de desligamento geral.



Figura 4.14. Quadros X e Y de distribuição.

Em sua porção externa existe um multimedidor que apresenta de forma constante o consumo energético da sala com informações de corrente e tensão em cada uma das fases.

Com a finalidade de facilitar a passagem de cabos, a porção inferior do quadro de distribuição é aberta e permite a passagem de ar, sendo assim, o modelo desenhado deve considerar a existência de uma climatização passiva dos barramentos elétricos.



Figura 4.15. Quadros X e Y de distribuição.

4.3.5 Obstruções Abaixo do Piso

Na Figura 4.16 pode-se notar a existência de uma grande obstrução presente abaixo do piso elevado e ao longo do corredor quente.

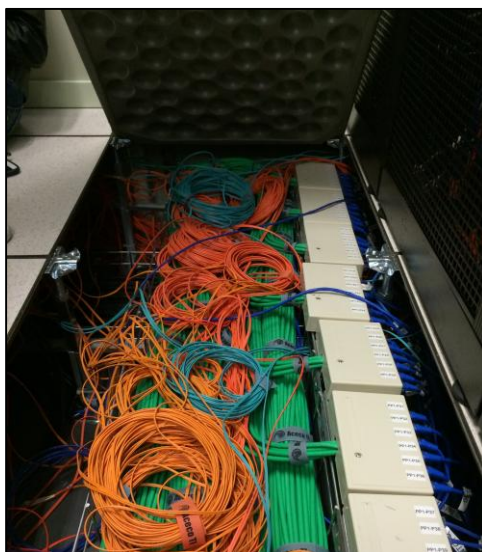


Figura 4.16. Obstruções por cabeamento não estruturado sob as placas E8, E9 e E10.

A modelagem do cabeamento acima foi feita, neste primeiro momento, por dois corpos diferentes, estando um interno e outro externo ao leito aramado. O corpo interno foi dimensionado de acordo com o crescimento gradual de cabos ao longo da calha (observado em campo), o seu preenchimento teve uma variação de 80% a 35% com uma permeabilidade de apenas 5% do escoamento dada à alta densidade de cabos. Um segundo bloco, externo ao leito aramado, foi dimensionado a fim de representar as caixas de distribuição, teve como característica ser um bloco sólido com uma leve dissipação total de 20 W, distribuídos uniformemente.

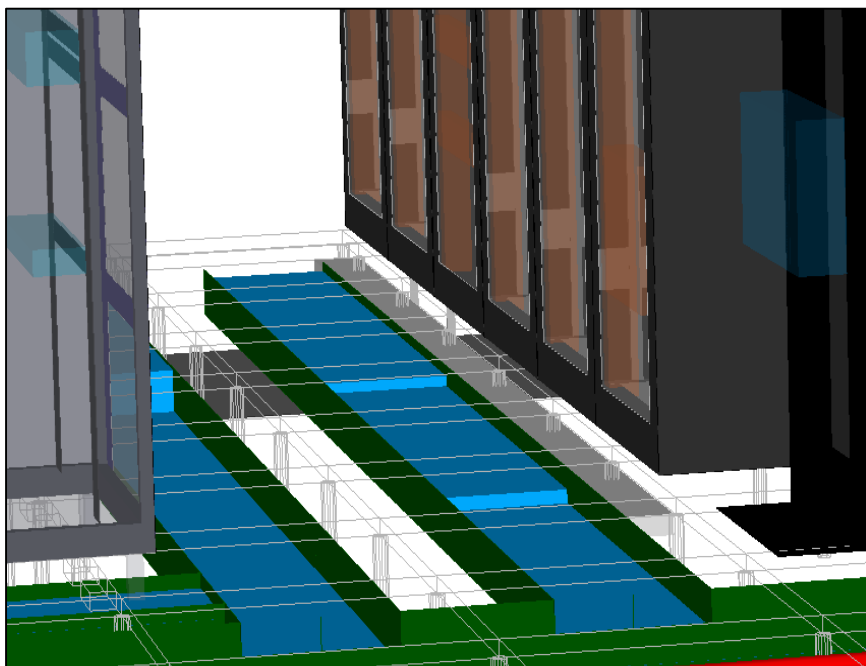


Figura 4.17. Modelagem da obstrução sob as placas E8, E9 e E10.

Uma segunda consideração é a existência de tomadas de alta amperagem que conectam os circuitos de alimentação elétrica dos ativos de TI. Como pode-se notar na Figura 4.18, esses dispositivos possuem um tamanho considerável e, quando em grande número, passam a influenciar de forma significativa o escoamento local. Situação ocorrente nessa sala cofre, principalmente sobre a placa perfurada A9.



Figura 4.18. Tomada de alta amperagem (Rauscher Stoecklin, 2011).

A modelagem desses dispositivos foi básica, definidos como corpos sólidos e impermeáveis. As suas disposições podem ser observadas na Figura 4.19.

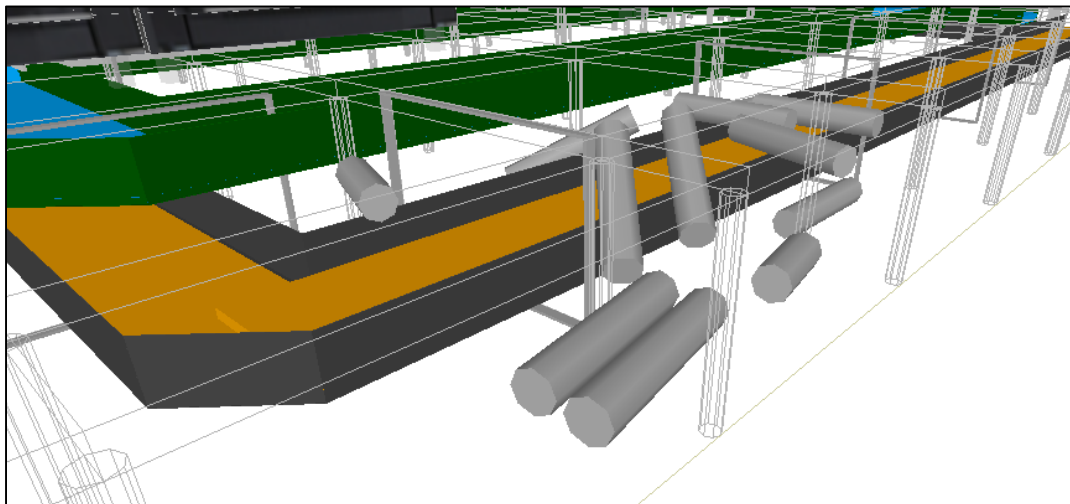


Figura 4.19. Modelagem de tomadas de alta amperagem.

Como pode-se notar ao longo das imagens de representação abaixo do piso, também foram modelados todos os pedestais de suporte do piso elevado. Estes são estruturas de metal que se localizados nos vértices de cada quadrante para o apoio das placas e, em sua grande quantidade, são estruturas que certamente influenciam o escoamento ao longo do *plenum*.

5 ESTUDO DE MALHA

O capítulo cinco visa um estudo de malha para o modelo proposto. Ao final deve-se propor uma malha ideal, que resulte nos melhores custos computacionais sem comprometer os resultados obtidos.

5.1 CRIAÇÃO DA MALHA

Como resultado à composição dos diversos componentes do modelo base desenvolvido no capítulo anterior, tem-se a geometria do Data Center com todas as definições de entrada (*inlet*), saída (*outlet*) e parede (*wall*). A partir desta geometria é então definido o domínio do projeto para a criação da malha em elementos discretos.

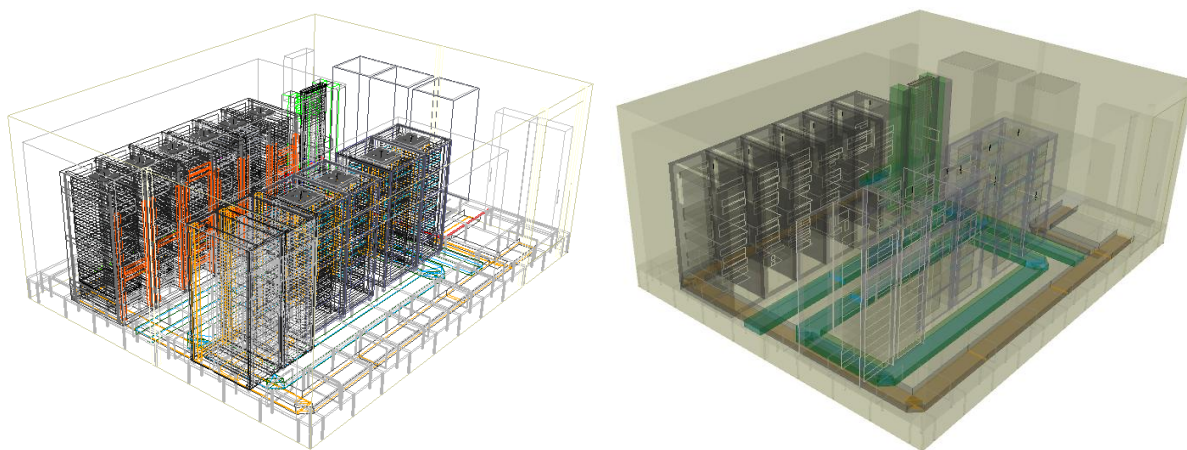


Figura 5.1. Criação da Geometria (a) e Domínio (b) do Data Center.

O software utilizado possui um gerador de malha próprio, provido de um algoritmo específico para a sua criação automática, sendo necessário apenas definir os parâmetros que se deseja, como o grau de refinamento, limites máximos e mínimos que o elemento pode ter e a razão de aspecto.

O elemento discreto utilizado na presente simulação é o hexaedro. A sua escolha é embasada pelo fato de que, no geral, os contornos geométricos dos componentes são simples e de ângulos retos, o que facilita a distribuição uniforme de cada unidade. De acordo com o gerador automático, a estruturação dos elementos é inexistente, o que é normal e esperado uma vez que a geometria não permite o crescimento contínuo e regular ao longo das fronteiras.

5.1.1 Grau de Refinamento

Dados limites coerentes, a fim de se evitar a propagação de erros ao longo das iterações numéricas, pode-se dizer que de forma geral quanto maior for o número de elementos que representam o domínio, maior será o nível de detalhamento e resolução da simulação, porém maior também será o custo computacional para resolver o sistema. Fato é que o aumento indiscriminado do grau de refinamento de malha não necessariamente resulta em melhores resultados, isso porque a precisão dos resultados não é diretamente ligada apenas à resolução.

Com base nessa premissa apresentada e a fim de se determinar a menor resolução para os melhores resultados, foi desenvolvido um estudo de sensibilidade de malha com dez domínios e diferentes graus de refinamento

Em vista que o modelamento da camada limite para este caso não é conveniente, a malha não precisa ser de alto refinamento nas superfícies em geral, cabendo apenas à casos de geometria específica. Para o estudo de malha deste projeto foram utilizadas seis malhas com diferentes graus de refinamento, sendo a inicial com 500 mil unidades e um passo de 1 milhão até a sexta, com 5,5 milhões. Não foi permitida a construção de elementos com dimensões superiores a um centímetro. Para todas as simulações serão impostas as condições limites de mil iterações ou um valor residual de 10^{-6} .

Vale ressaltar que, por se tratar de uma geração automática de malha, os números de elementos implementados não necessariamente correspondem ao valor final criado, sendo um número próximo que melhor os distribui. Sendo assim, abaixo encontra-se uma tabela com os reais quantitativos de elementos em cada caso.

Tabela 5.1. Quantitativo de elementos por malha.

Malha	Valor Implementado	Valor de Resposta
#1	500.000 elementos	529.494 elementos
#2	1.500.000 elementos	1.492.499 elementos
#3	2.500.000 elementos	2.587.290 elementos
#4	3.500.000 elementos	3.404.485 elementos
#5	4.500.000 elementos	4.399.540 elementos
#6	5.500.000 elementos	5.480.395 elementos

5.1.2 Análise

Para a comparação dos diferentes graus de refinamento foram utilizados três critérios básicos e essenciais, sendo eles o campo de pressão abaixo do piso (Figura 5.2), temperaturas de insuflamento pelas placas perfuradas (Figura 5.3) e temperatura de retorno das máquinas de ar condicionado (Figura 5.4).

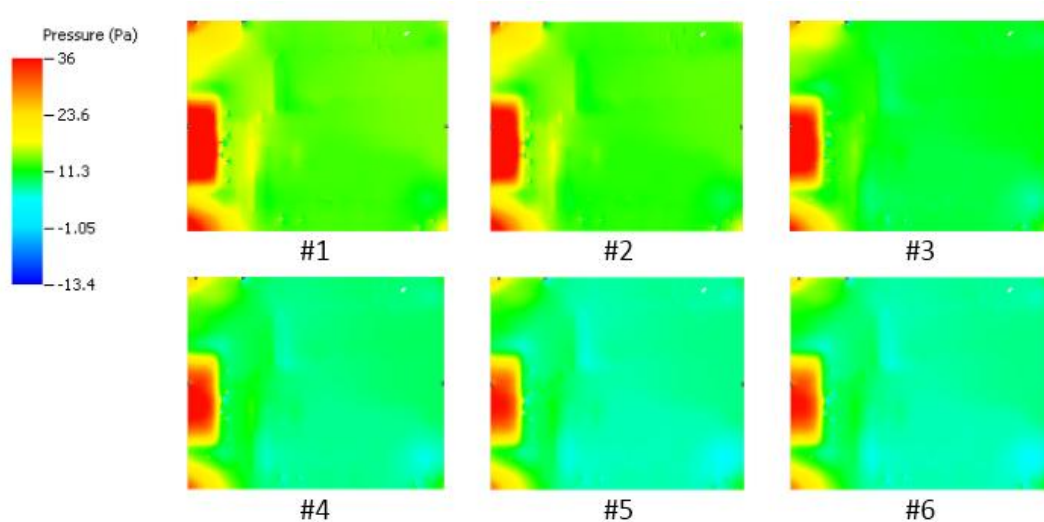


Figura 5.2. Campos de pressão para os diferentes graus de refinamento.

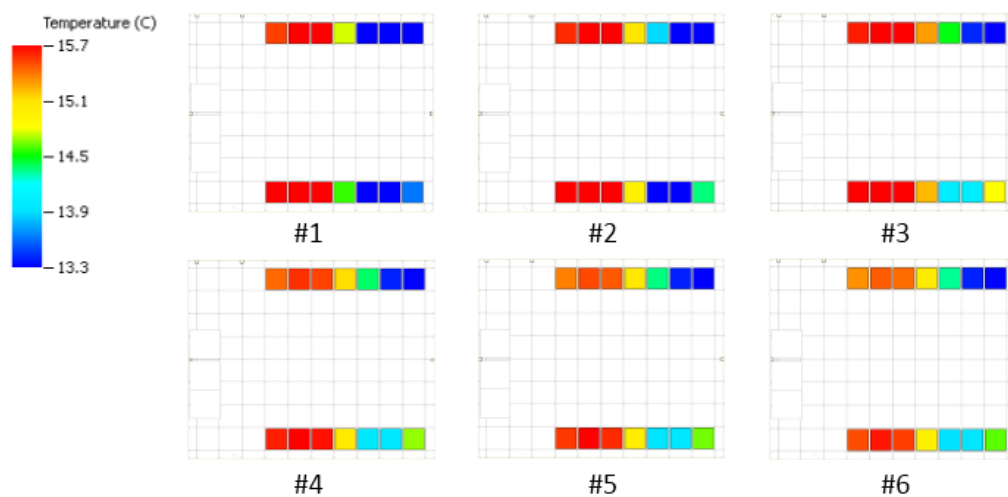


Figura 5.3. Temperaturas de insuflamento para os diferentes graus de refinamento.

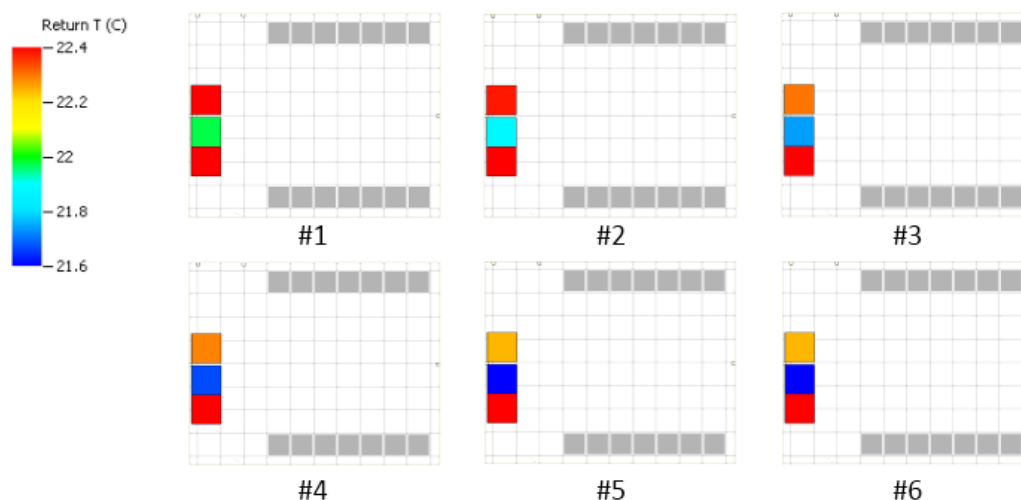


Figura 5.4. Temperaturas de retorno para os diferentes graus de refinamento.

A comparação dos seis modelos lado-à-lado permite notar a alta influência do grau de refinamento à resposta da simulação, resultando que modelos de menor grau de refinamento apresentaram maiores pressões abaixo do piso e maiores temperaturas de insuflamento e retorno.

Uma extrapolação plausível ao comportamento global apresentado é que apenas as malhas de maior grau de refinamento conseguem sensibilizar a resposta para a perda de carga do escoamento. Esse argumento é embasado pelo fato de que a pressão decai ao longo das simulações, onde a perda passa a ser menor, a velocidade maior e, consequentemente, menor pressão.

A Tabela 5.2 apresenta os tempos de convergência para cada simulação.

Tabela 5.2. Tempo de convergência para os diferentes graus de refinamento.

Malha	Tempo de Convergência
#1	34 minutos
#2	65 minutos
#3	96 minutos
#4	156 minutos
#5	237 minutos
#6	280 minutos

Portanto, levando-se em consideração a nítida convergência dos resultados a partir da simulação de 4,5 milhões de elementos e não percebendo alterações com o aumento da resolução da malha, conclui-se que o grau de refinamento #5 é o mais apropriado frente ao custo computacional e deve ser utilizado para representar o ambiente.

6 MODELO FINAL

Neste capítulo será abordada a metodologia de refinamento do modelo base por meio de informações extraídas por instrumentação.

6.1 INSTRUMENTAÇÃO

Em conformidade ao que já foi mencionado na Sessão 3.2.3, foram coletadas informações de potência elétrica, vazão de ar e temperatura nos mais diferentes pontos do Data Center com o objetivo de compreender a forma com que estes recursos são operados e consumidos na prática. Nos Anexos V, VI, VII e VIII encontram-se as especificações de cada equipamento utilizado.

6.1.1 Análise de Energia

O processo de análise de energia foi feito com a utilização de um multimedidor em cada circuito trifásico dos quadros de distribuição, os quais são separados de forma que cada um deles atenda apenas a um rack, podendo este último ser atendido por mais de um circuito.



Figura 6.1. Analisador de energia.

Como resultado, o analisador de energia expressou valores de consumo (corrente) que servirão para refinar o consumo elétrico dos equipamentos que, inicialmente operando em carga nominal, passarão a representar a real carga de trabalho. Os resultados de cada circuito podem ser observados na Tabela 10.9 do Anexo X.

6.1.2 Análise de Vazão

A tomada de vazão foi realizada por meio de um balômetro matricial semelhante ao apresentado na Figura 6.2. O mesmo possui uma matriz de velocidade localizada ao final do curso que realiza tomadas de pressão estática e dinâmica em 16 pontos distintos, o cálculo para a definição do resultado é muito parecido ao de um tubo de pitot.



Figura 6.2. Balômetro matricial.

Uma consideração relevante aos valores obtidos com o equipamento é que os mesmos tenderiam a ser inferiores aos reais, isso porque o próprio posicionamento do balômetro sob a placa representa uma obstrução mecânica e, conseqüentemente, uma perda de carga ao escoamento. Entretanto, um procedimento padrão e explicado em manual permite fazer a correção desses valores por meio de um “calibração” do equipamento.

A vazão resultante é uma média de valores calculados ao longo de dois minutos, à um passo de um segundo (totalizando 120 valores). A Tabela 6.1 apresenta os valores médios resultantes.

Tabela 6.1. Análise do balômetro – Vazão nas placas perfuradas.

Placa	Vazão [CFM]	Vazão [m³/s]	Placa	Vazão [CFM]	Vazão [m³/s]
A4	513,608	0,242	H4	530,689	0,250
A5	479,446	0,226	H5	504,184	0,238
A6	513,608	0,242	H6	493,582	0,233
A7	547,770	0,258	H7	514,786	0,243
A8	486,514	0,229	H8	470,611	0,222
A9	517,142	0,244	H9	522,443	0,246
A10	479,446	0,226	H10	482,980	0,228

6.1.3 Análise de Temperatura

Para a análise de temperatura, foram utilizados basicamente dois tipos de equipamentos: o termógrafo, capaz de gerar uma imagem de um campos de temperatura ao longo de superfícies; e os iButton, pequenos sensores de temperatura com memória interna para captação ao longo do tempo.



Figura 6.3. Sensores de temperatura (iButtonLink, 2014).

A análise termográfica foi realizada em duas etapas. De imediato, ao entrar no Data Center, foram tiradas imagens com um termógrafo, o objetivo deste procedimento é poder captar as temperaturas mais próximas possíveis do regime permanente (quando a sala ainda estava fechada), antes que fossem alteradas com a movimentação interna. Algumas das imagens termográficas podem ser visualizadas no Anexo IX.

A etapa seguinte consistiu na alocação dos pequenos sensores ao longo da sala cofre, eles foram distribuídos da seguinte forma: 3 na parte frontal e 3 na parte traseira de cada rack, 1 sob o centro de cada placa perfurada, 8 no retorno e 4 no insuflamento do sistema de ar condicionado, totalizando 96 sensores de temperatura.

Após algumas horas de coleta de dados, os sensores de temperatura são extraídos e analisados por meio de curvas temporais, à exemplo da apresentada na Figura 6.4, um sensor localizado ao centro da entrada do rack G7.

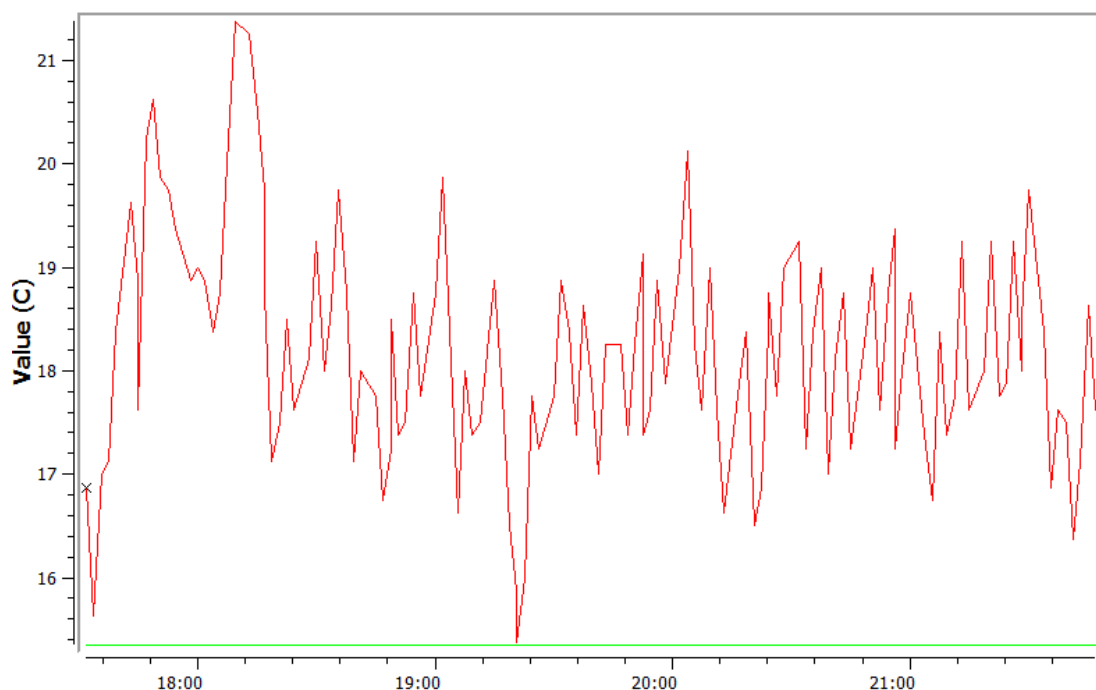


Figura 6.4. Perfil de temperatura central na entrada do rack G7.

Após analisar cada sensor, foram geradas tabelas de temperatura média em cada posição.

Tabela 6.2. Análise dos iButtons – Temperatura nos racks.

Rack	Frontal Superior	Frontal Meio	Frontal Inferior	Traseiro Superior	Traseiro Meio	Traseiro Inferior
B4	20,3°C	22,1°C	17,3°C	26,4°C	26,0°C	21°C
B5	21,1°C	20,6°C	17,8°C	25,8°C	26,0°C	21,3°C
B7	21,3°C	19,0°C	15,8°C	26,3°C	27,1°C	21,3°C
B8	21,3°C	18,0°C	16,0°C	27,3°C	25,8°C	20,5°C
B9	20,1°C	17,1°C	18,8°C	30,9°C	30,4°C	17,8°C
B10	19,3°C	16,1°C	18,5°C	30,1°C	30,8°C	20,8°C
G4	21,4°C	20,6°C	16,4°C	23,0°C	21,5°C	17,5°C
G5	20,5°C	16,9°C	17,4°C	26,3°C	25,9°C	17,5°C
G6	22,4°C	15,6°C	17,1°C	26,4°C	26,5°C	16,8°C
G7	22,3°C	18,4°C	16,8°C	28,0°C	27,9°C	16,4°C
G8	21,9°C	14,5°C	18,9°C	27,0°C	25,3°C	15,4°C
G9	22,4°C	14,5°C	16,4°C	30,5°C	26,1°C	17,9°C
G10	23,9°C	20,1°C	16,5°C	27,8°C	27,8°C	15,8°C

Tabela 6.3. Análise dos iButtons – Temperatura nas placas perfuradas.

Placa	Temperatura	Placa	Temperatura
A4	15,4°C	H4	15,5°C
A5	15,5°C	H5	15,7°C
A6	15,6°C	H6	15,6°C
A7	15,2°C	H7	15,3°C
A8	14,4°C	H8	14,2°C
A9	12,9°C	H9	12,9°C
A10	13,8°C	H10	13,9°C

Devido ao posicionamento dos sensores não ser dado de forma regular nas máquinas de ar condicionado, como nos casos anteriores, as informações foram expressas por meio do diagrama exposto na Figura 6.5.

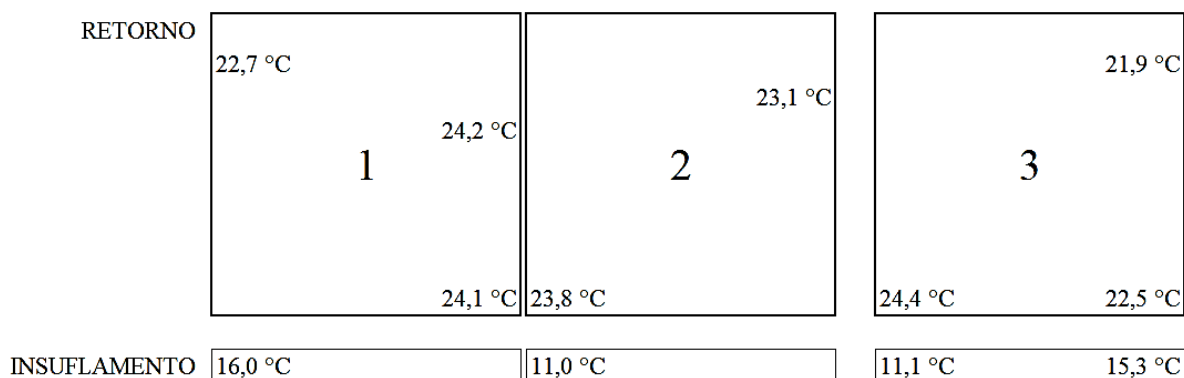


Figura 6.5. Análise dos iButtons – Temperatura nas máquinas de ar condicionado.

6.2 IMPLEMENTAÇÃO NO MODELO

Finalizada a coleta de dados pela instrumentação do Data Center, foi realizado um confronto com os resultados do modelo base. Foram feitas correções nas potências dos equipamentos, obstruções gerais e um refinamento de malha.

Indubitavelmente, o ideal seria realizar uma análise de consumo em cada um dos equipamentos para então fazer a correção no modelo, porém infelizmente essa prática vê-se inviável pela quantidade de equipamentos e o tempo de execução que seria necessário (limitado pelo órgão público). Sendo assim, a adaptação do problema foi feita por meio de uma redução, em escala, do consumo dos equipamentos de cada circuito até que seu somatório representasse os valores da Tabela 10.9.

Percebeu-se também que, de forma geral, a vazão pelas placas perfuradas do corredor B estavam superiores ao mensurado experimentalmente. Para corrigir esse problema, foi realizada uma segunda avaliação em campo e remodelou-se as obstruções abaixo do piso, pois esta é uma região onde existe um grande número de circuitos elétricos e eles poderiam estar mal representados. Ao final desse remodelamento foi também realizado um refinamento de malha de forma a melhorar o contorno sobre os novos corpos.

O modelo final apresentou um quantitativo de 4.436.640 elementos, os quais obtiveram em seu pior caso uma razão de aspecto de 4,459. Viu-se a análise de razão de aspecto importante pois, caso o seu valor fosse elevado, implicaria em um conjunto de elementos esbeltos que distanciam os pontos de fechamento das equações de continuidade.

Ao final foram comparados dos resultados da instrumentação frente à análise numérica e de acordo com as tabelas comparativas dos sensores, frontais (Tabela 6.4) e traseiros (Tabela 6.5), os valores de médios de temperatura distanciaram-se em no máximo 10%.

Tabela 6.4. Análise comparativa dos sensores frontais.

Rack	Superior	Simulado	Meio	Simulado	Inferior	Simulado	Discrepância Média
B4	20,3°C	23,3°C	22,1°C	23,1°C	17,3°C	16,4°C	5%
B5	21,1°C	22,6°C	20,6°C	23,1°C	17,8°C	18,3°C	8%
B7	21,3°C	19,9°C	19,0°C	19,1°C	15,8°C	15,6°C	-3%
B8	21,3°C	20,5°C	18,0°C	15,5°C	16,0°C	15,5°C	-7%
B9	20,1°C	18,4°C	17,1°C	14,9°C	18,8°C	20,1°C	-5%
B10	19,3°C	22,2°C	16,1°C	15,6°C	18,5°C	20,3°C	8%
G4	21,4°C	24,0°C	20,6°C	22,8°C	16,4°C	16,1°C	8%
G5	20,5°C	21,0°C	16,9°C	16,0°C	17,4°C	18,0°C	0%
G6	22,4°C	22,1°C	15,6°C	15,7°C	17,1°C	16,5°C	-1%
G7	22,3°C	22,6°C	18,4°C	18,3°C	16,8°C	16,5°C	0%
G8	21,9°C	24,7°C	14,5°C	15,0°C	18,9°C	20,4°C	9%
G9	22,4°C	23,0°C	14,5°C	15,4°C	16,4°C	16,5°C	3%
G10	23,9°C	24,0°C	20,1°C	20,8°C	16,5°C	20,2°C	7%

Tabela 6.5. Análise comparativa dos sensores traseiros.

Rack	Superior	Simulado	Meio	Simulado	Inferior	Simulado	Discrepância Média
B4	26,4°C	26,1°C	26,0°C	26,3°C	21,0°C	25,1°C	6%
B5	25,8°C	24,9°C	26,0°C	26,2°C	21,3°C	25,7°C	5%
B7	26,3°C	25,4°C	27,1°C	27,6°C	21,3°C	26,0°C	6%
B8	27,3°C	27,0°C	25,8°C	25,0°C	20,5°C	22,2°C	1%
B9	30,9°C	32,8°C	30,4°C	31,1°C	17,8°C	20,7°C	7%
B10	30,1°C	30,7°C	30,8°C	33,3°C	20,8°C	17,0°C	-1%
G4	23,0°C	26,1°C	21,5°C	23,7°C	17,5°C	17,0°C	8%
G5	26,3°C	27,6°C	25,9°C	26,6°C	17,5°C	17,1°C	2%
G6	26,4°C	27,4°C	26,5°C	27,0°C	16,8°C	17,5°C	3%
G7	28,0°C	28,1°C	27,9°C	27,9°C	16,4°C	17,2°C	1%
G8	27,0°C	28,9°C	25,3°C	25,0°C	15,4°C	18,7°C	7%
G9	30,5°C	29,2°C	26,1°C	25,5°C	17,9°C	18,8°C	-1%
G10	27,8°C	30,5°C	27,8°C	30,2°C	15,8°C	18,1°C	10%

7 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados da simulação numérica do modelo final. Além disso, serão feitas propostas de melhorias de baixo custo que impactariam de forma positiva o Data Center.

7.1 RESULTADOS DO MODELO

Esta simulação possui como objetivo a avaliação da capacidade e da eficiência do sistema de climatização instalado no Data Center governamental e, de acordo com os resultados obtidos, propor soluções simples para a sua melhoria de performance.

7.1.1 Abaixo do Piso

A climatização dos racks presentes no Data Center é realizada através do fornecimento de uma vazão de ar frio. Quanto maior for o fluxo de ar ou quanto menor for a temperatura desse fluxo, maior é a quantidade de calor que se consegue remover dos equipamentos de TI. Os campos de pressão e temperatura abaixo do piso elevado são fundamentais para a análise de climatização de um ambiente, pois determinam a vazão e a temperatura do ar que passa por cada uma das placas de insuflamento e chega aos equipamentos desejados.

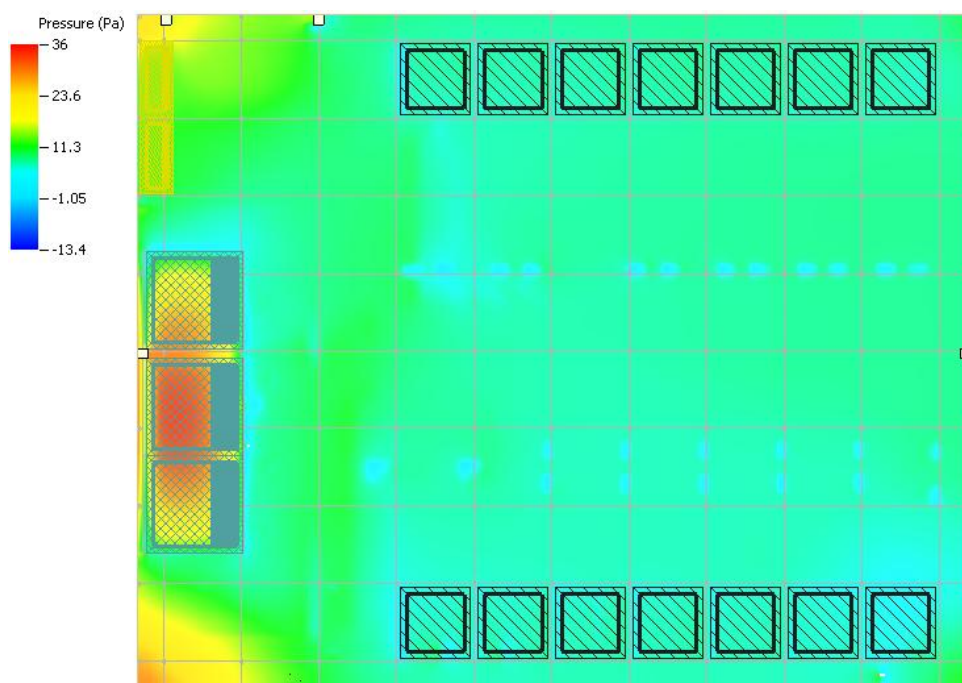


Figura 7.1. Campo de pressão abaixo do piso elevado.

Por meio da Figura 7.1 podemos notar o comportamento do campo de pressão. A pressão do ar abaixo do piso elevado tende a ser muito elevada nas mediações da máquina de ar condicionado pela colisão com os limites do *plenum* (reação que também pode ser observada nas extremidades da sala), mas ao ganhar velocidade, o escoamento eleva a sua dinamicidade e reduz a pressão de forma brusca (negativa quando comparada à pressão acima do piso).

A Figura 7.2 apresenta o campo de temperatura abaixo do piso elevado.

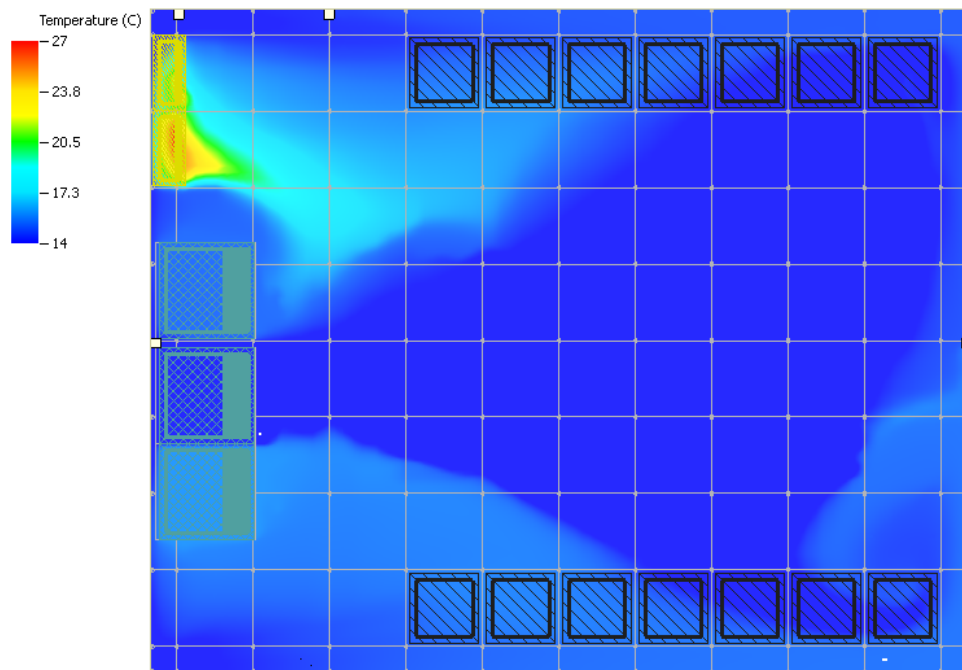


Figura 7.2. Campo de temperatura abaixo do piso elevado.

O campo de temperatura apresentado demonstra bem o comportamento do ar insuflado. Com uma temperatura variando entre 16°C e 14°C, pode-se notar uma pequena mancha de massa de ar à uma temperatura maior, próximo aos quadros de distribuição. Ela é dada pela, já citada, diferença de pressão negativa que induz a contaminação o *plenum* com o ar ambiente pelas frestas dos quadros de distribuição.

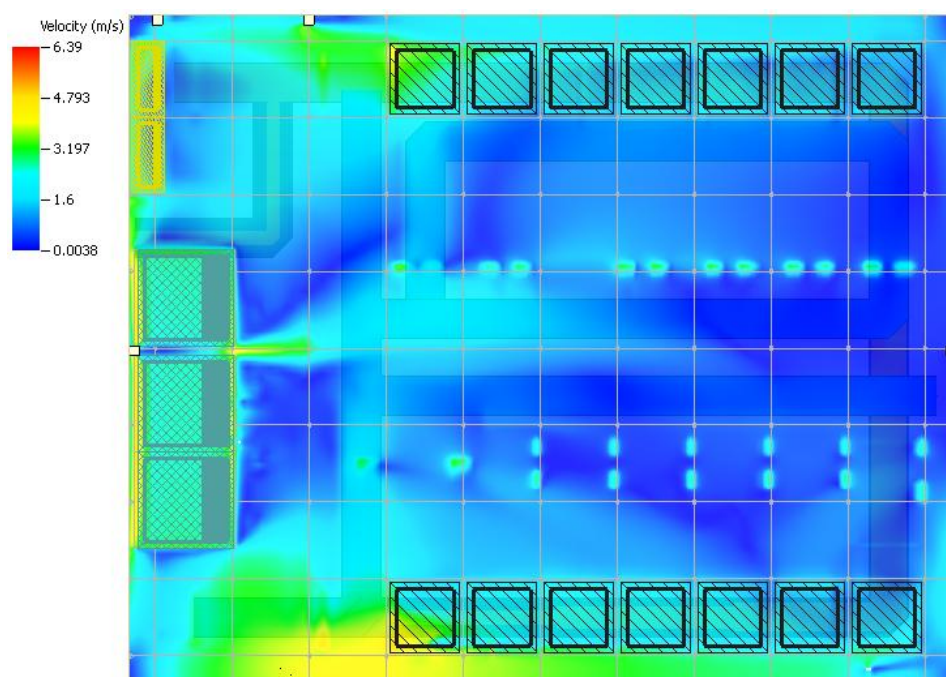


Figura 7.3. Campo de velocidade abaixo do piso elevado.

A Figura 7.3 permite notar a influência das barreiras físicas de cabeamento no escoamento e estrutura de apoio do ar condicionado abaixo do piso, o que representa uma grande perda de carga ao escoamento e, por sua vez, reduz a vazão nas placas perfuradas mais à frente.

7.1.2 Insuflamento

A Figura 7.4 apresenta de forma gráfica a vazão por placa perfurada.

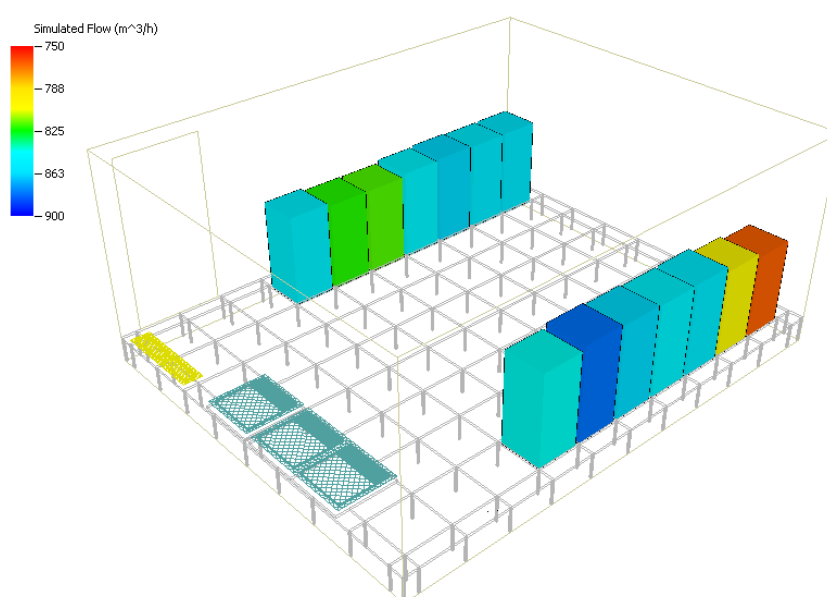


Figura 7.4. Vazão por placa perfurada.

A princípio, ao se analisar a imagem anterior pode-se ter a impressão de que a alimentação está saudável dado ao seu caráter majoritariamente uniforme, mas isso não é verdade. Levando-se em consideração também a Figura 7.5 pode-se notar que a disponibilidade não está condizente com a demanda por rack.

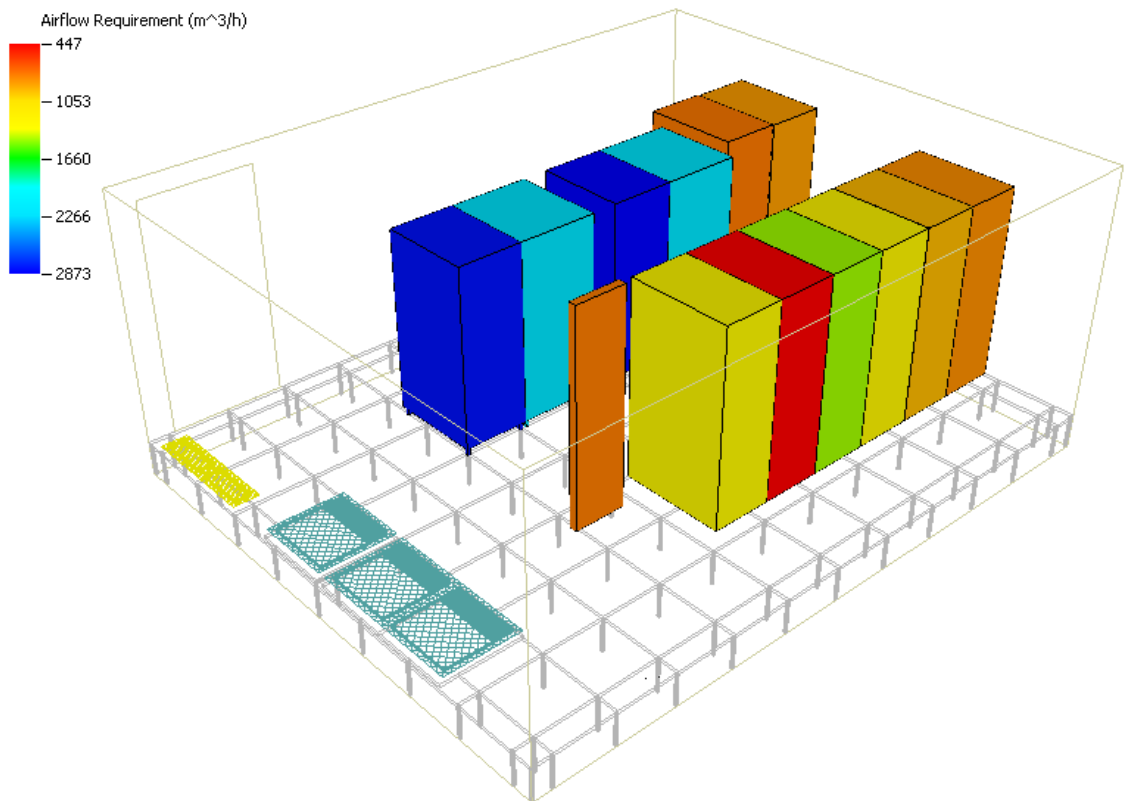


Figura 7.5. Vazão requerida por rack.

Os racks de armazenamento B4, B5, B7, e B8 não exigem uma grande demanda de fluxo de ar para a sua climatização gerando um desperdício muito grande, ela poderia ser deslocada para o corredor G e alimentar de uma forma mais saudável os servidores locais. Além disso, essa massa não aproveitada tende a voltar ao retorno da máquina de ar condicionado e perturbar o seu comportamento. Esta pode ser uma das causas que fizeram com que o equipamento de climatização mais próximo reduzisse o nível de trabalho do seu compressor e insuflasse com uma temperatura levemente superior, Figura 7.2.

As imagens a seguir reforçam a existência dos by-pass, Figura 7.6 e Figura 7.7, pela presença de placas perfuradas localizadas de forma próxima ao retorno do ar.

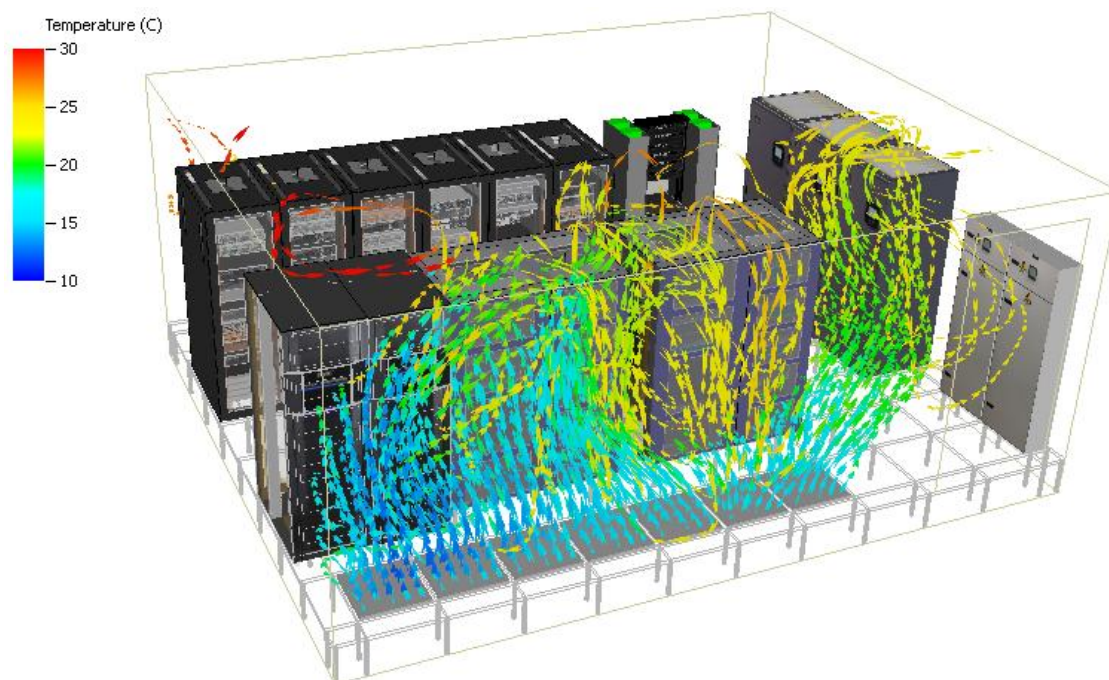


Figura 7.6. Linhas de corrente nas placas de insuflamento no corredor B.

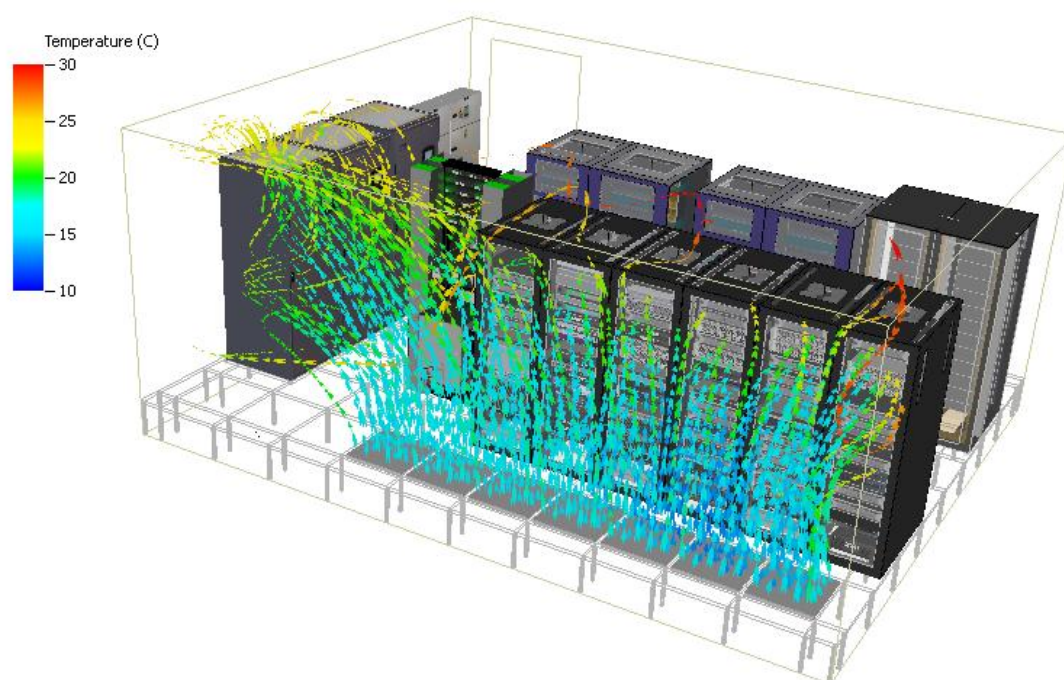


Figura 7.7. Linhas de corrente nas placas de insuflamento no corredor G.



Figura 7.8. Recirculação nos ventiladores acima dos racks no corredor G.

O desbalanceamento entre a demanda e a disponibilidade de ar prejudica a pressurização do corredor frio G. Dessa forma, os ventiladores localizados nas porções superiores dos racks (dimensionados para direcionar a massa de ar quente de exaustão ao retorno do ar condicionado) acabam acentuando a recirculação e superaquecendo os servidores locais.

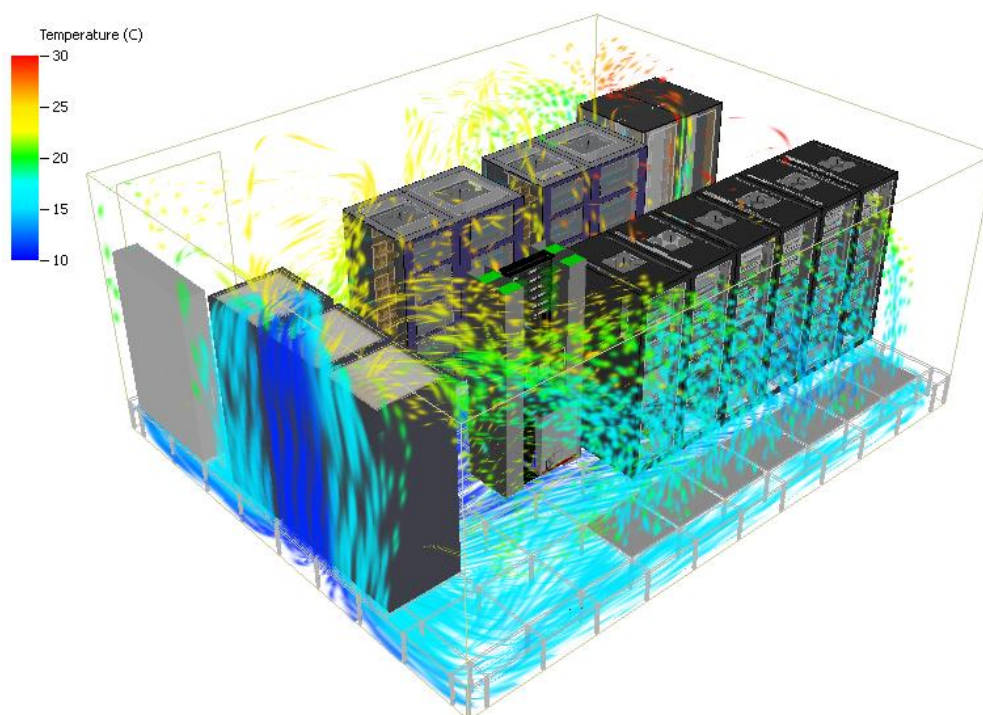


Figura 7.9. Curtos-circuitos de ar nos equipamentos de ar condicionado.

A Figura 7.9 apresenta outro problema observado, a existência de curtos-circuitos de forma direta entre o insuflamento e o retorno do ar condicionado. Por padrão, ao se realizar a instalação desse tipo de equipamento de precisão, retira-se partes do piso elevado, vedando todo e qualquer espaço sobressalente com espuma apropriada. Neste caso o procedimento correto não foi realizado.

7.1.3 Campo de Temperatura

Os campos de temperatura em corte ilustram de uma forma ainda mais gráfica os problemas de by-pass nos corredores frios, onde há uma considerável massa de ar frio sendo deslocada em direção aos equipamentos de ar condicionado.

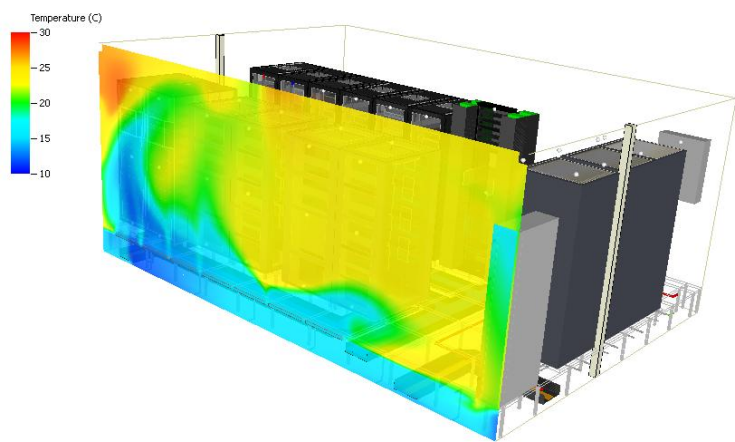


Figura 7.10. Campo de temperatura no corredor frio B.

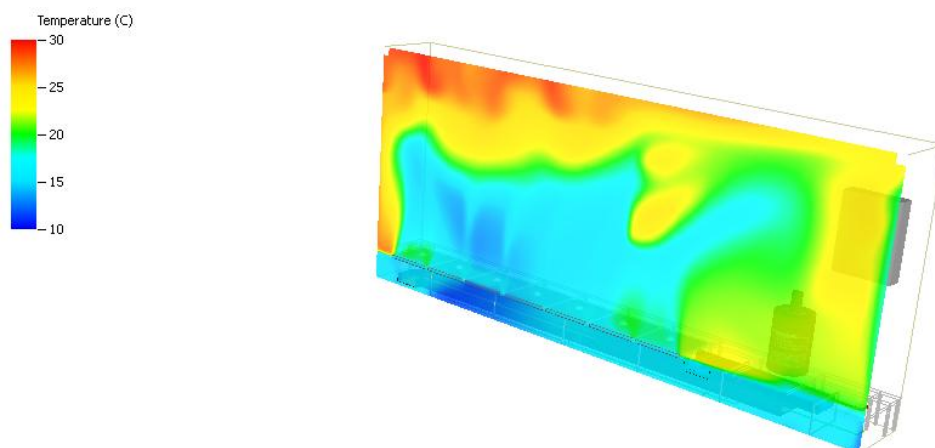


Figura 7.11. Campo de temperatura no corredor frio G.

A Figura 7.12 mostra a ineficiência do retorno. Sensibilizadas pela massa gelada do by-pass, as máquinas de ar condicionado reduzem a sua atividade de climatização e não conseguem refrigerar o ar quente de forma eficiente, o qual acumula na outra extremidade.

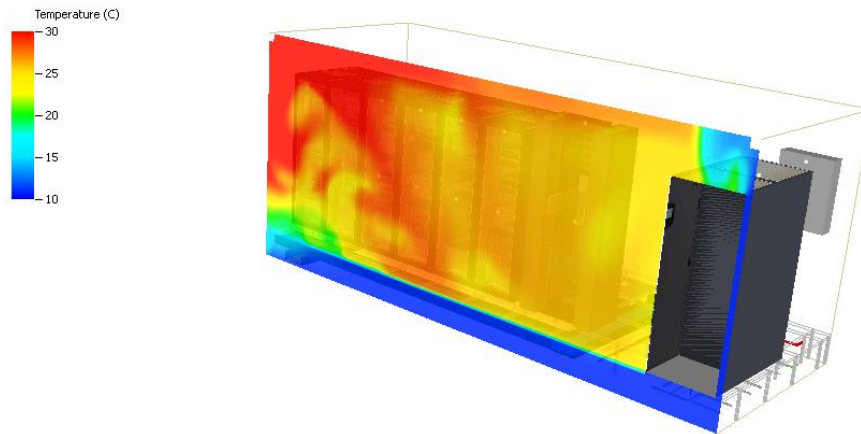


Figura 7.12. Campo de temperatura no corredor quente.

7.1.4 Racks

O grande diferencial em se usar uma ferramenta de análise numérica em problemas como este é a capacidade de poder observar as causas de cada problema em suas minuciosidades. As imagens abaixo demonstram dois problemas específicos que estavam ocorrendo por recirculações internas aos racks G10 e G8.

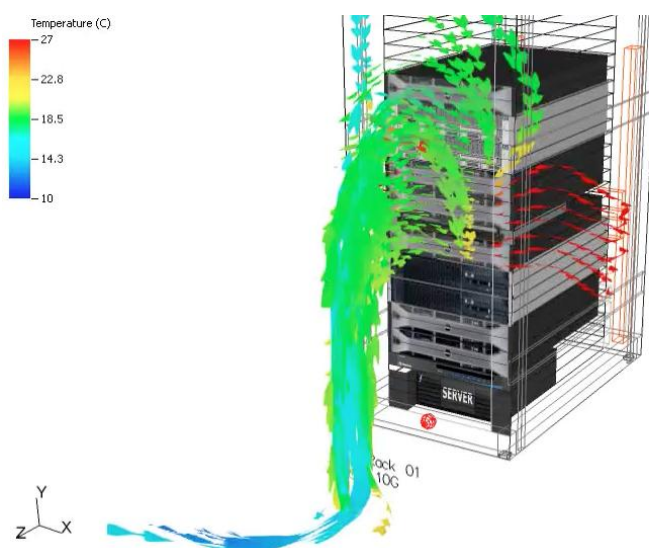


Figura 7.13. Recirculação no rack G10.

A Figura 7.13 apresenta o motivo pelo qual o servidor alocado no décimo slot estava sendo superaquecido. Apesar de haver uma disponibilidade de ar suficiente para a climatização, a lateral exposta internamente permitia a recirculação do ar proveniente do corredor quente.

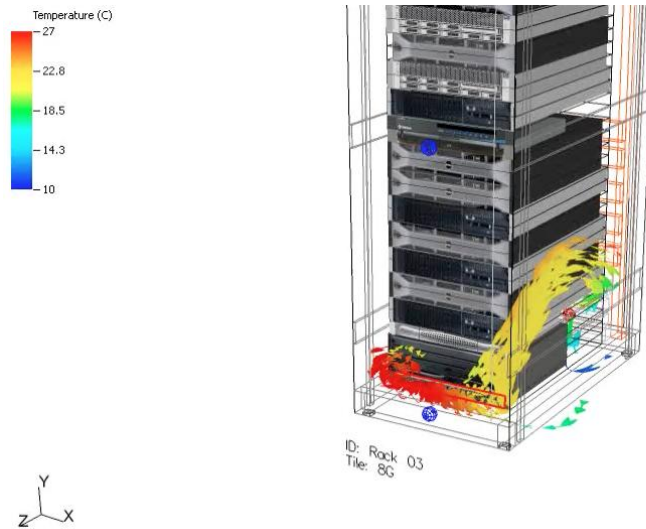


Figura 7.14. Recirculação no rack G8.

7.1.5 Análise de Cálculos

Disponibilidade

No ambiente computacional foram simulados os casos de falha do sistema de climatização, em que ocorre a parada da climatizadora 1, 2 ou 3. Nos três foram aplicadas a metodologia apresentada na Sessão 3.1 e concluiu-se que o ambiente possui, no pior cenário, numa disponibilidade de 88%, quando há a falha da climatizadora 2.

No caso crítico, 83 dos 178 equipamentos passam a ter uma temperatura média de entrada superior ao limite recomendável pela ASHRAE, 27°C, o que representa 11.269,3 watts do total de 37.600 dos equipamentos de TI.

$$Disponibilidade = \frac{(37,6 \text{ kW} - 11,2693 \text{ kW})}{37,6 \text{ kW}} = 0,7003 \text{ ou aproximadamente } 70\%. \quad (16)$$

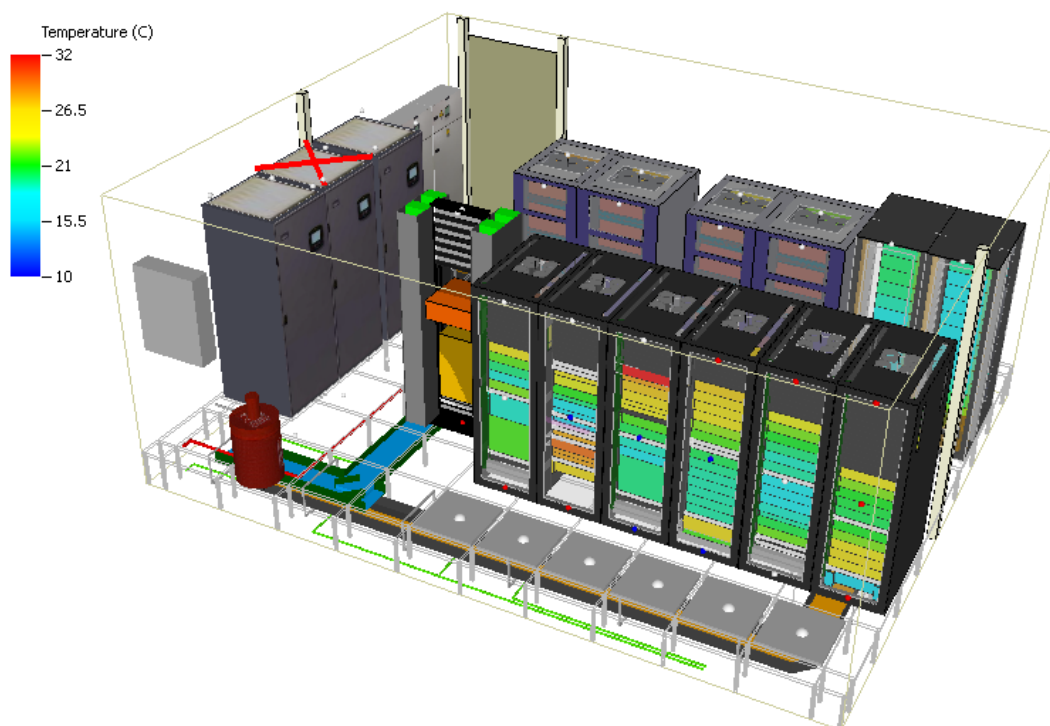


Figura 7.15. Temperatura média de entrada dos equipamentos de TI [falha da ACU 2].

Capacidade

Originalmente, o cálculo de capacidade é definido pela capacidade de carga máxima suportada pelo ambiente pela carga idealizada em projeto. Entretanto, essa metodologia não pode ser aplicada dessa forma pois a configuração de projeto (com duas máquinas em funcionamento e uma em stand-by, suportando 44 kW) não é mais obedecida e a redundância não é mais aplicada. Portanto, para este caso específico, considerou-se que o projeto original tivesse sido para o funcionamento contínuo das três máquinas, o que suportaria uma carga de 66 kW.

Definido o cálculo de capacidade, foi feito o escalonamento dos racks de servidores de acordo com a metodologia. Nenhuma modificação foi aplicada aos demais racks por se tratarem de sistemas não expansivos, a sua modificação seria incondizente com a realidade. Utilizou-se dois tipos de servidores de mesmas especificações técnicas, mas de geometrias diferentes para serem alocados tanto na blade quanto nos slots padrões. Possuem vazão máxima de 204 m³/h e potência máxima de 800 W. A Figura 7.16 mostra o posicionamento dos mesmos.

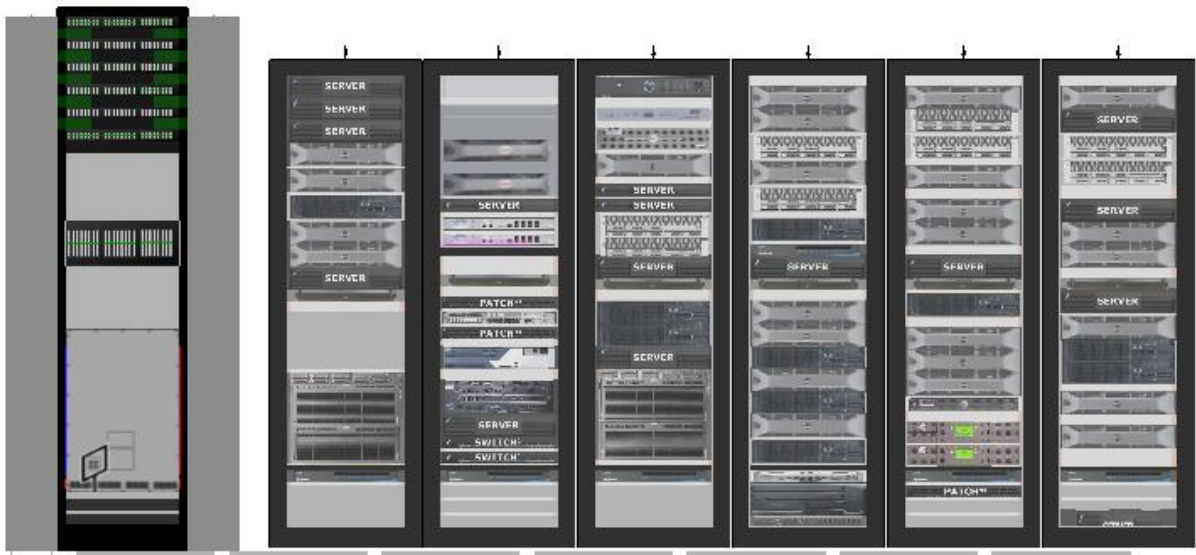


Figura 7.16. Disposição dos servidores padrão para o cálculo de Capacidade.

Foram realizados os cálculos e o ambiente virtual suportou uma carga máxima de 55.8 kW antes de apresentar os primeiros ativos superaquecidos.

Dessa forma, aplicando a equação da Sessão 3.1, chega-se à um valor de 0,8455, ou 85%.

$$Capacidade = \frac{55,8 \text{ kW}}{66 \text{ kW}} = 0,8455 \text{ ou aproximadamente } 85\%. \quad (17)$$

Eficiência

Por fim, aplicando a metodologia a fim de se determinar a eficiência do sistema de climatização chega-se ao resultado de 0,7584.

$$Eficiência = \frac{37,6 \text{ kW}}{37,6 \text{ kW} + 11,98 \text{ kW}} = 0,7584 \text{ ou aproximadamente } 76\%. \quad (18)$$

7.2 PROPOSTAS DE MELHORIA

Ao longo de toda a análise foram pontuadas as diversas deficiências do ambiente no âmbito de ar condicionado e disponibilidade, e elaborou-se um fluxo de trabalho com o plano de melhorias.

As atividades foram pensadas e organizadas em nove etapas, sendo elas:

1. Desligar os ventiladores acima dos racks de servidores;
2. Aplicação de escovas nas passagens de cabos do piso elevado;
3. Obstruir as passagens de ar no perímetro das máquinas de ar condicionado;
4. Rebalancear a vazão das placas de piso elevado;
5. Rearranjar o posicionamento dos ativos de TI nos racks de servidores;
6. Vedação dos slots vazios com tampas;
7. Otimizações locais nos racks G8 e G10;
8. Elevar os *setpoints* dos equipamentos de ar condicionado;
9. Aplicar régua de dupla alimentação nos equipamentos de fonte única.

7.2.1 Ventiladores dos Racks

Pensou-se em simular o desligamento dos ventiladores localizados na porção superior dos racks de servidores. O resultado de tal atitude não foi nem um pouco positivo, resultando no superaquecimento de muitos ativos.

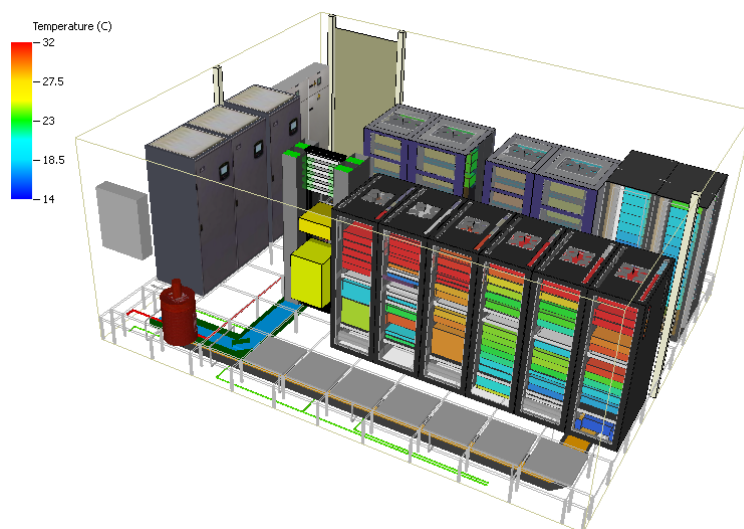


Figura 7.17. Superaquecimento após o desligamento dos ventiladores do corredor G.

Pode-se perceber com isso que apesar dos mesmos influírem em uma recirculação forçada, a sua não utilização causa uma estagnação ainda maior do ar no corredor quente, potencializando os *hot spots*. Optou-se assim por mantê-los ativos.

7.2.2 Escovas nas Passagens de Cabos

Mais conhecidas no mercado como *Brushes*, nome traduzido para o inglês, essas escovas possuem a finalidade de dificultar a perda de carga do *plenum* pela passagem de ar por entre os cabos.



Figura 7.18. Escovas para passagens de cabos em piso elevado (Air-Guard, 2006).

O resultado foi positivo. O fluxo de ar que antes era vazado por esses dispositivos passou a ser redirecionado às placas perfuradas, as quais passaram a insuflar 3.542 metros cúbicos por segundo, frente aos 3.276 anteriores.

7.2.3 Vedação Perimetral do Ar Condicionado

A Figura 7.19 apresenta a resposta do ambiente à vedação do perímetro do ar condicionado, o qual deixou de ser sensibilizado pelo by-pass e passou a operar de acordo com a temperatura de retorno do corredor quente.

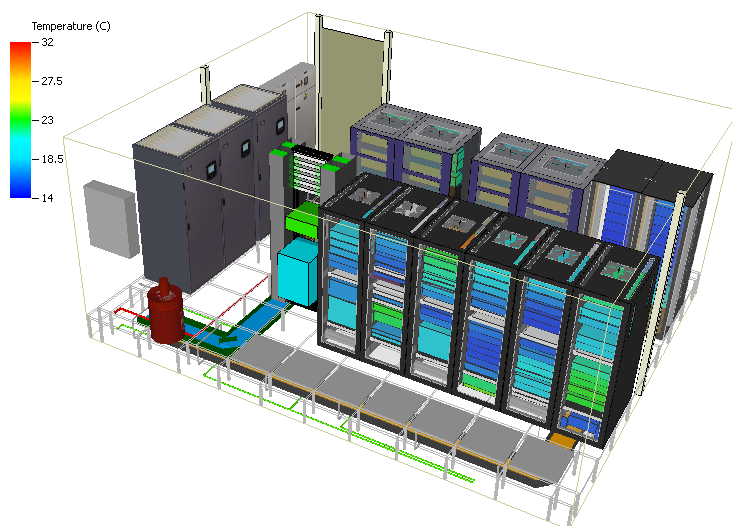


Figura 7.19. Pós vedação perimetral dos equipamentos de ar condicionado.

7.2.4 Rebalanceamento de Vazão Insuflada

Para o rebalanceamento das placas perfuradas foram testadas algumas possíveis configurações que permitissem reduzir by-pass e aumentar a disponibilidade de ar refrigerado no corredor G. O layout que melhor atendeu às expectativas foi no qual foram retiradas as placas A4, A7 e H4.

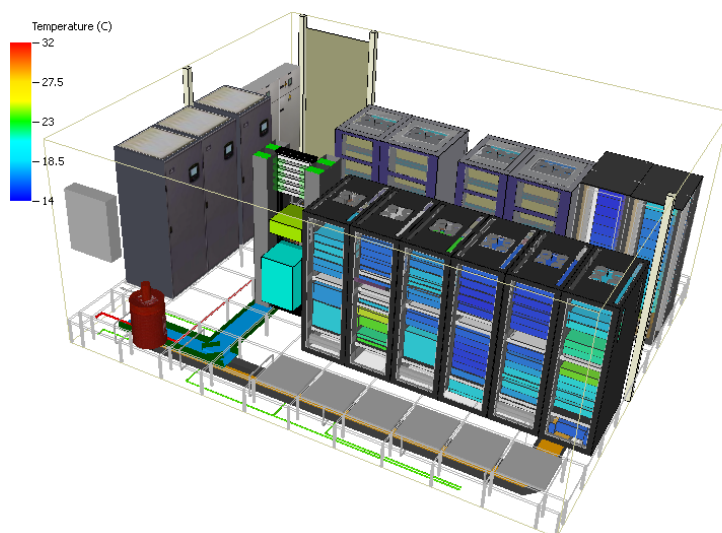


Figura 7.20. Rebalanceamento da vazão de ar insuflada.

7.2.5 Remanejamento dos Ativos de TI

O remanejamento em si não ofereceu grandes melhorias ao escoamento, mas a opção por fazê-lo foi uma decisão de projeto que facilitaria a vedação dos slots sobressalentes.

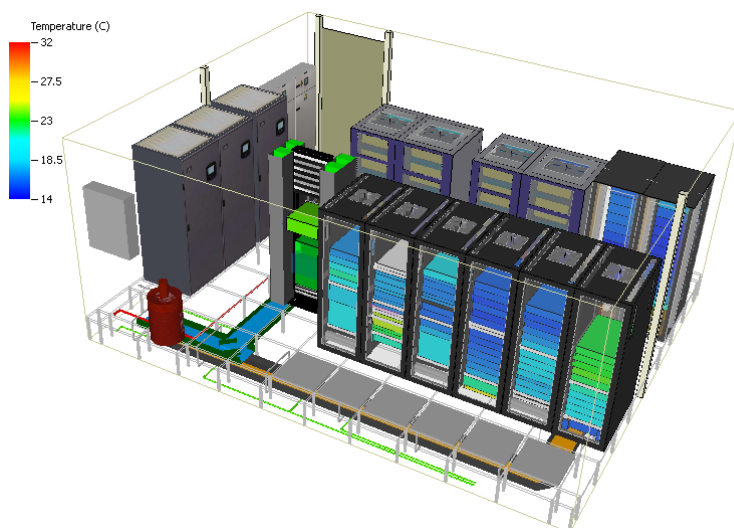


Figura 7.21. Rearranjo dos ativos de TI.

7.2.6 Vedação dos Slots Vazios

O procedimento de vedação dos slots vazios fez com que houvesse uma grande redução no índice de recirculação no corredor G. Isso porque aumentou-se o isolamento dos corredores quente e frio, e o ar que antes era usado para realimentar os servidores locais passou a retornar ao sistema de ar condicionado.

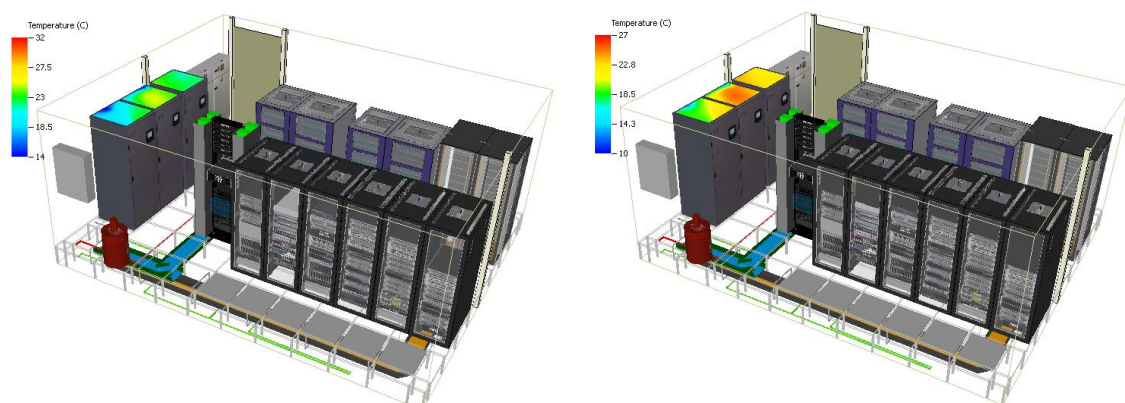


Figura 7.22. Vedação dos slots vazios.

7.2.7 Otimização dos Racks G8 e G10

Para a otimização dos racks, foram utilizadas espumas isolantes próprias para Data Center (semelhantes às usadas na vedação perimetral do ar condicionado). A Figura 7.23 apresenta o resultado após as modificações.

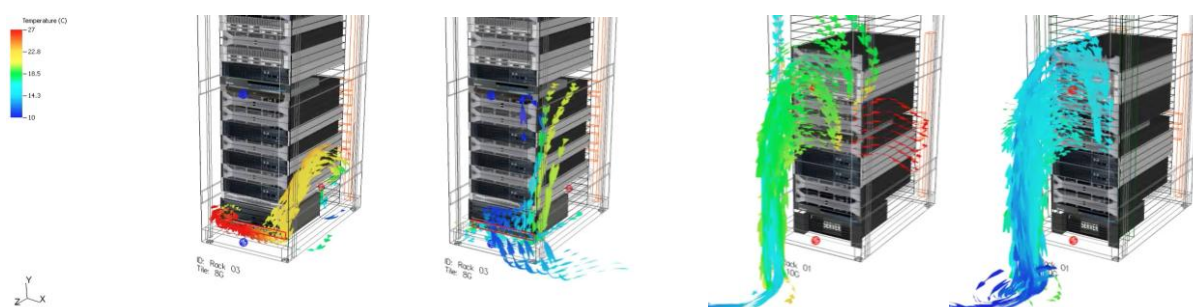


Figura 7.23. Melhoria nos racks G8 e G10.

7.2.8 Aumento dos Setpoints

Após todas as modificações supracitadas, o desempenho do sistema de climatização aumentou e permitiu com que os *setpoints* de operação das máquinas de ar condicionado também fossem

aumentados, passando de 20°C para 22°C, sem que houvessem superaquecimento em nenhum dos equipamentos.

7.2.9 Análise de Cálculos

Foram recalculados novamente os três índices paramétricos para a comparação de estado da sala antes e depois das modificações propostas.

Disponibilidade

Na segunda análise de disponibilidade, apenas 46 dos 178 equipamentos tiveram uma temperatura média de entrada superior ao limite recomendável pela ASHRAE, 27°C, o que representa 4 509,6 watts do total de 37 600 dos equipamentos de TI.

$$\text{Disponibilidade} = \frac{(37,6 \text{ kW} - 4,5096 \text{ kW})}{37,6 \text{ kW}} = 0,8801 \text{ ou aproximadamente } 88\%. \quad (19)$$

Capacidade

Para a capacidade, após as melhorias o ambiente suportou uma carga máxima de 60.2 kW antes de apresentar os primeiros ativos superaquecidos.

Dessa forma, aplicando a equação da Sessão 3.1, chega-se à um valor de 0,9121, ou 91%.

$$\text{Capacidade} = \frac{60,2 \text{ kW}}{66 \text{ kW}} = 0,9121 \text{ ou aproximadamente } 91\%. \quad (20)$$

Eficiência

Após o aumento dos *setpoints*, o consumo dos equipamentos de ar condicionado foi reduzido, conforme explicado na Sessão 3.1.3. A eficiência passou portanto de 0,7584 para 0,7785.

$$\text{Eficiência} = \frac{37,6 \text{ kW}}{37,6 \text{ kW} + 8,8592 \text{ kW}} = 0,7785 \text{ ou aproximadamente } 78\%. \quad (21)$$

7.3 CUSTO DAS MELHORIAS

Foi realizada uma análise de custo de mercado a fim de se estabelecer uma noção de preços, caso haja o interesse na implementação das propostas de melhoria. A Tabela 7.1 apresenta os quantitativos e valores absolutos que seriam gastos com material.

Tabela 7.1. Custo de material.

Materiais	Quantidade [und.]	Preço Unitário	Preço Total
Escovas – Split Integral Groummet (16cm x 16 cm)	2	R\$ 240,00	R\$ 480,00
Escovas – Koldlock 6” Rount Goummet	12	R\$ 220,00	R\$ 1.640,00
Tampa de Slot – Hotlok 1U	30	R\$ 20,00	R\$ 600,00
Tampa de Slot – Hotlok 2U	20	R\$ 28,00	R\$ 560,00
Fita Espuma Seladora – Aislelok Acrycel Sealing Tape 2”	3	R\$ 1.500,00	R\$ 4.500,00
Placas de Piso Cegas – Tate (60cm x 60cm)	3	R\$ 68,64	R\$ 205,92
Total			R\$ 8.985,92

Além disso, considerou-se também o custo de mão de obra para a implementação dos dispositivos e modificações de layout e posicionamento dos equipamentos. A Tabela 7.2 apresenta os preços sugeridos de acordo com a tabela de insumos SINAP não desonerados para a cidade de Brasília no mês de outubro.

Tabela 7.2. Custo de mão-de-obra.

Materiais	Quantidade [hrs.]	Preço Unitário	Preço Total
Engenheiro	8	R\$ 104,64	R\$ 837,12
Técnico Eletrotécnico	16	R\$ 39,13	R\$ 626,08
Técnico de Ar Condicionado	16	R\$ 39,13	R\$ 626,08
Auxiliar de Manutenção	24	R\$ 24,52	R\$ 588,48
Total			R\$ 2.677,76

Por fim, considerando uma carga tributária em torno de 40%, estima-se um custo de implementação em torno de 16.330 reais.

7.4 ANÁLISE ECONÔMICA

A economia financeira pode ser estimada com base nos índices abordados. Analisando o leve aumento na eficiência energética do ambiente, o sistema de ar condicionado passou a economizar 4,77 kW por hora de trabalho que, a um preço médio de 44 centavos por quilowatt, representa uma redução de aproximadamente 1.510 reais ao fim do mês na conta de energia.

O parâmetro de ganho pelo aumento da capacidade pode ser definido considerando-se que parte do capital investido, antes desperdiçado, passou a ser recuperado. Hoje, o Data Center governamental possui um limite de capacidade de carga de 55,8 kW que, após alcançado, forçaria o órgão à investir em um novo ambiente, cujo o preço giraria facilmente na casa de milhões. Aplicando-se as melhorias propostas o limite do ambiente sofreria um aumento de 4,4 kW da capacidade máxima, ou seja, 6,7% dos milhões antes investidos passariam a estar disponíveis para usufruto do órgão.

Por fim, o índice de disponibilidade talvez seja o índice de maior importância, isso porque ele representa a segurança e confiabilidade que se tem no Data Center e nos dados que ele possui. Os prejuízos por uma queda na operação são incalculáveis e dependem muito do escopo de utilização que pode ir desde uma grande agência financeira, onde perderia a capacidade de operação na bolsa de valores, à um hospital, no qual a operação poderia representar o custo de uma vida.

8 CONCLUSÃO

Este capítulo apresenta as considerações finais ao projeto desenvolvido.

Ao longo de todo o ano de execução do projeto de graduação, dividido em duas etapas, foram desenvolvidos inúmeros estudos, conceitos e técnicas de modelamento que permitiram alcançar o objetivo inicial: propor uma metodologia de estudo e otimização, com base na ferramenta de CFD, capaz de aprimorar ao máximo a eficiência e alocação dos recursos de climatização internos à um Data Center comum. A relevância deste projeto é decorrente da constante busca por melhoria de performance, tornando cada vez mais forte a ideia de que aumentar a eficiência e segurança do sistema de climatização é a chave para a economia energética e financeira.

Desde a primeira etapa do projeto, momento no qual foi apresentada a metodologia de comparação e criado um modelo conceitual de teste, viu-se a análise numérica como uma excelente ferramenta de estudo capaz de fornecer informações antes não conhecidas. Além disso, uma vez validado do modelo frente às reais condições de contorno do problema (segunda fase do projeto), a ferramenta passa a oferecer um caráter preditivo de suma importância, através dela pode-se realizar modificações estratégicas no ambiente virtual e verificar qual seria o comportamento caso fosse empregado no caso real. Isolou-se assim a prática da tentativa e erro, tão danosa ao Data Center.

Com uma discrepância de no máximo 10% dentre os resultados simulados e reais, a ferramenta de análise numérica permitiu a aplicação da metodologia de comparação nos parâmetros de disponibilidade, capacidade e eficiência. A Figura 8.1 apresenta a evolução de performance após a aplicação das modificações propostas.

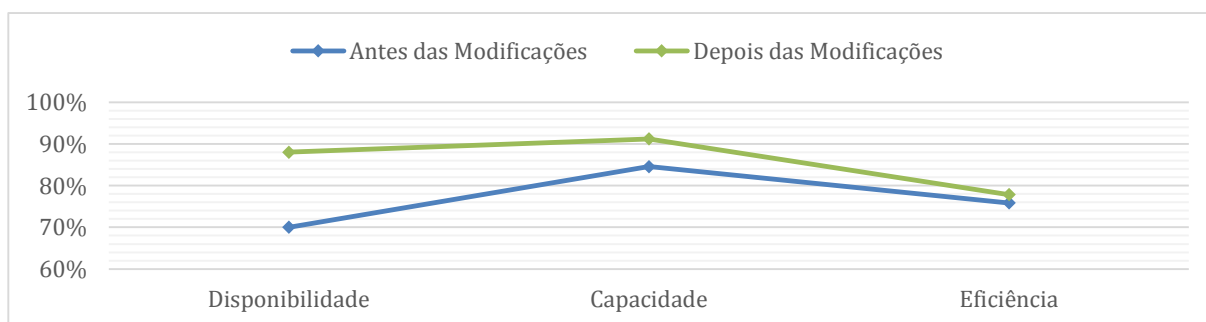


Figura 8.1. Gráfico de performance.

Os ganhos com a adesão das recomendações feitas nessa análise são grandes. Ao final deste trabalho foi realizada uma análise econômica que, em conjunto com as informações de custos, prevê um retorno

sobre o investimento em no máximo onze meses, levando em conta apenas a economia no consumo do sistema de climatização. Entretanto, esse valor pode se tornar ainda mais expressivo ao levar em consideração os demais parâmetros não estimáveis de capacidade e, principalmente, disponibilidade.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ai Net. 2014. Cooling. *Ai Net*. [Online] Ai Net, 2014. [Citado em: 20 de Maio de 2014.] <http://www.ai.net/data-centers/cooling>.

Air-Guard. 2006. Air-Guard Flush Mount. *Air-Guard, the cool choice*. [Online] PDU Cables, 2006. [Citado em: 22 de Novembro de 2014.] http://www.pducables.com/products_air_guard_flush_mount.html.

ASHRAE. 2011. *Thermal Guidelines for Data Processing Environments – Expanded Data Center Classes and Usage Guidance*. s.l. : ASHRAE, 2011.

Banco do Brasil. 2013. BB e Caixa inauguram Datacenter em Brasília. *Portal BB*. [Online] Banco do Brasil, 20 de Março de 2013. [Citado em: 18 de Abril de 2014.] <http://www.bb.com.br/portalbb/page118,3366,3367,1,0,1,0.bb?codigoNoticia=36954>.

Blog Powernet. 2014. Refrigeración Eficaz en Un Data Center. *Blog PowerNet*. [Online] PowerNet, 7 de Abril de 2014. [Citado em: 12 de Maio de 2014.] <http://powernet.es/web/blog/refrigeracion-eficaz-en-un-data-center/>.

Brito Carrijo, Flávio. 2013. *Roteiro para Projeto de Climatização de Data Centers com Análise de Estudo de Caso de Uma Instalação Real*. Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília. Brasília : s.n., 2013. p. 95, Projeto de Graduação.

Chagas, Marcos Wilson Pereira. 2014. *Sistemas de Energia e Climatização*. São Paulo : Érica Ltda., 2014. 978-85-365-0497-1.

Compliance Training Solutions. 2013. Secure Learning Management System - Hosting Facilities. *Compliance Training Solutions*. [Online] Compliance Training Solutions, 20 de Dezembro de 2013. [Citado em: 15 de Abril de 2014.] <http://www.compliancetraining.com/LearningManagementSuite/SecureHostingFacilities.aspx>.

Corrêa, Paulo Cézar Pereira. 2012. Numerical Simulation of Airfoils Applied to UAVs. [ed.] Encit. *14th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*. 14, 18-22 de Novembro de 2012.

Datacenter Dynamics. 2013. Emerson recebe patente por tecnologia de resfriamento em linha. *Datacenter Dynamics*. [Online] Datacenter Dynamics, 23 de Janeiro de 2013. [Citado em: 27 de Maio de 2014.] <http://www.datacenterdynamics.com.br/focus/archive/2013/01/emerson-recebe-patente-por-tecnologia-de-resfriamento-em-linha>.

Durand-Estebe, Baptiste, et al. 2013. Data center optimization using PID regulation in CFD simulations. *Energy and Buildings*. 2013, Vol. 60, pp. 154-164.

EIA. 2013. Data Center Cidade Digital BB-Caixa. *Engenharia e Arquitetura*. [Online] Engenharia e Arquitetura, 23 de Abril de 2013. [Citado em: 20 de Maio de 2014.] <http://www.engenhariae-arquitetura.com.br/noticias/730/Data-Center-Cidade-Digital-BB-Caixa.aspx>.

Ellsworth, Michael J. 2005. High Powered Chip Cooling — Air and Beyond. [Online] 1 de Agosto de 2005. [Citado em: 22 de Abril de 2014.] <http://www.electronics-cooling.com/2005/08/high-powered-chip-cooling-air-and-beyond/>.

Emerson. 2014. The Liebert XDV: Vertical, Above-Cabinet Cooling Module. *Emerson Network Power*. [Online] Emerson Network Power, 2014. [Citado em: 27 de Maio de 2014.] <http://www.emersonnetworkpower-partner.com/Network-News-June-2013-Product-Spotlight/default.aspx>.

Furihata, Yuki, et al. 2013. Efficient Cooling System for IT Equipment in a Data Center. 2013, pp. 152-159.

Furihata, Yuki, et al. 2004. Improving the Efficiency of Cooling Systems in Data Centers Considering Equipment Characteristics. 2004, pp. 32-37.

Gaille, Brandon. 2013. 10 Biggest Data Centers in the World. *BrandonGaille*. [Online] BrandonGaille, 23 de Setembro de 2013. [Citado em: 1 de Abril de 2014.] <http://brandongaille.com/10-biggest-data-centers-the-world/>.

GrupoOrion. 2009. Consultoria e Projetos para Data Centers. [Online] GrupoOrion, 2009. [Citado em: 1 de Maio de 2014.] <http://www.grupoorion.com.br/portugues/index.php?fuse=produtosServicos.consultproj>.

Harlow, F. H. 2004. Fluid Dynamics in Group T-3 Los Alamos Nacional Laboratory. 28 de Março de 2004.

Hayama, H., et al. 2003. Planning of Air-conditioning and Circulation Systems for Data Center. *INTELEC'03*. 23 de Outubro de 2003, pp. 140-146.

Herrlin, Magnus K. 2008. Airflow and Cooling Performance of Data Centers. *ASHRAE Transactions*. 2008, Vol. II, 114, pp. 182-187.

iButtonLink. 2014. iButtons. *iButtonLink Technology*. [Online] 2014. [Citado em: 22 de Novembro de 2014.] <http://www.ibuttonlink.com/collections/ibuttons>.

Kant, Krishna. 2009. A Tutorial on State of the Art, Issues, and Challenges. *Computer Networks*. 2009, Vol. 53, pp. 2939-2965.

Koomey, Jonathan G. 2011. Growth in Data Center Electricity Use 2005 to 2010. 2011.

Lu, Tao, et al. 2011. Investigation of air management and energy performance in a data center in Finland: Case study. 2011, 43, pp. 3360-3372.

Marin, Paulo Sérgio. 2011. *Data Centers - Desvendando cada passo: conceitos, projeto, infraestrutura física e eficiência energética.* São Paulo : Érica Ltda., 2011. 978-85-365-0366-0.

Niemann, John, Brown, Kevin e Avelar, Victor. 2011. Impact of Hot and Cold Aisle Containment on Data Center Temperature and Efficiency. *Data Center Science Center.* 2011, Vol. II, p. 14.

Patterson, M.K., Pratt, A e Kumar, P. 2006. Enterprise Servers and Data Centers: Opportunities for Energy Savings. *Energy Star.* [Online] EPA, Fevereiro de 2006. [Citado em: 5 de Abril de 2014.] http://www.energystar.gov/ia/products/downloads/MPatterson_APratt_Case_Study.pdf.

Pimenta, João. 2013. Cálculo de Carga Térmica. *Instalações Termomecânicas II.* Brasília : s.n., 2013, 5.

Rauscher Stoecklin. 2011. High current plugs and sockets. *Rauscher Stoecklin.* [Online] Rauscher Stoecklin, Agosto de 2011. [Citado em: 11 de Novembro de 2014.] <http://www.raustoc.ch/High-current-plugs-and-sockets.171.0.html>.

Renner, Maurício. 2012. Serpro: data center de R\$ 188 milhões. *Baguete.* [Online] Baguete Jornalismo Digital, 14 de Agosto de 2012. [Citado em: 18 de Abril de 2014.] <http://www.baguete.com.br/noticias/14/08/2012/serpro-data-center-de-r-188-milhoes>.

Schmidt, R., et al. 2005. Maintaining Datacom Rack Inlet Temperatures with Water Cooled Heat Exchangers. *The Pacific Rim/ASME International Electronics Packaging Technical Conference and Exhibition.* 2005.

Simplex. 2014. Data Center Curtain Various Configurations. *Data Center Curtain.* [Online] Simplex, 2014. [Citado em: 18 de Maio de 2014.] <http://www.simplexstripdoors.com/DCillustrations.htm>.

Singh, Umesh, et al. 2010. CFD-Based Operational Thermal Efficiency Improvement of a Production Data Center. 2010.

TelecityGroup. 2014. Paris Data Centres. *TelecityGroup.* [Online] TelecityGroup, 2014. [Citado em: 29 de Abril de 2014.] <http://www.telecitygroup.com/data-centres/colocation-data-centre-paris.htm>.

Thermos. 2014. Soluções em Climatização de Ambientes. *Themos Refrigeração e Ar Condicionado.* [Online] Thermos, 2014. [Citado em: 12 de Maio de 2014.] http://www.thermosrefrigeracao.com.br/expansao_direta.php.

TV Energy. 2012. Heat Pumps Factsheet. *Renewable Energy for the Thames Valley.* [Online] TV Energy, 2012. [Citado em: 10 de Maio de 2014.] <http://www.tvenergy.org/factsheet-heatpumps.htm>.

Wang, David. 2006. Cooling Challenges and Best Practices for High Density Data and Telecommunication Centers. *Conference on High Density Microsystem Design and Packaging and Component Failure Analysis.* 2006.

—. **2006.** Cooling Challenges and Best Practices for High Density Data and Telecommunication Centers. *Proceedings of HDP'06*. 2006.

Блог компании King Servers. 2013. Hurricane Electric: колокация в США — надежно и практично. *Habrahabr*. [Online] Блог компании King Servers, 25 de Novembro de 2013. [Citado em: 20 de Maio de 2014.] <http://habrahabr.ru/company/kingservers/blog/203556/>.

10 ANEXOS

		Pág.
Anexo I	Normas Técnicas	84
Anexo II	Características Gerais do Caso Teste	85
Anexo III	Características Gerais do Caso Real	86
Anexo IV	Lista de Equipamentos	87
Anexo V	Especificações Básicas do Analisador de Energia	90
Anexo VI	Especificações Básicas do Balômetro Matricial	91
Anexo VII	Especificações Básicas dos Sensores de Temperatura	92
Anexo VIII	Especificações Básicas do Termômetro	93
Anexo IX	Comparativo de Imagens Termográficas	94
Anexo X	Análise de Energia dos Quadros de Distribuição	95
Anexo XI	Plantas Baixa da Sala Cofre do Caso Real	97

Tabela 10.1. Normas Técnicas.

Norma ABNT	Situação
ABNT NBR 15976:2011 Redução das emissões de fluidos frigorigênicos halogenados em equipamentos e instalações estacionais de refrigeração e ar-condicionado [Requisitos gerais e procedimentos].	Em vigor
ABNT NBR 15848:2010 Sistemas de ar-condicionado e ventilação [Procedimentos e requisitos relativos às atividades de construção, reformas, operação e manutenção das instalações que afetam a quantidade do ar interior].	Em vigor
ABNT NBR 16401-1:2008 Instalações de ar-condicionado [Sistemas centrais e unitários]. Parte 1: Projeto das instalações.	Em vigor
ABNT NBR 11215:1990 Equipamentos unitários de ar condicionado e bomba de calor - Determinação da capacidade de resfriamento e aquecimento [Método de ensaio].	Em vigor
ABNT NBR 10080:1987 Instalações de ar-condicionado para salas de computadores [Procedimento].	Em vigor
ABNT NBR 15960:2011 Instalações de ar-condicionado – Recolhimento, reciclagem e refrigeração (3R) [Procedimento].	Em vigor
ABNT NBR 15627-1:2008 Condensadores a ar remotos para refrigeração. Parte 1: Especificação, requisitos de desempenho e identificação.	Em vigor
ABNT NBR 15627-2:2008 Condensadores a ar remotos para refrigeração. Parte 2: Método de ensaio.	Em vigor
ABNT NBR 15247:2004 Classificação e métodos de ensaio de resistência ao fogo.	Em vigor

(Chagas, 2014)

Tabela 10.2. Características gerais do caso teste.

Característica	Valor
Detalhes Físicos	
Área	15,10 m ²
Altura	3,00 m
Altura do Piso Elevado	0,35 m
Detalhes da Infraestrutura	
Número de ACUs	2
Número de PDUs	2
Número de Racks	4
Número de Equipamentos de TI	32
Número de Slots Vazios	64
Número de Slots Ocupados	88
Número de Placas Perfuradas	12
Dampers nas Placas Perfuradas	Não
Tamanho das Placas de Piso	600x600 mm
Área Perfurada das Placas	25%
Carga de TI de Projeto	20,00 kW
Carga de TI aplicada	7,76 kW
Carga das PDUs	2,25 kW
Densidade de Carga de Projeto	1474 W/m ²
Densidade de Carga Aplicada	663 W/m ²
Detalhes do Sistema de Climatização	
Capacidade de Climatização Nominal (Sensível)	23,60 kW
Tipo de Insuflamento	Inferior
Tipo de Retorno	Superior
Posicionamento do Sensor de Temperatura	Retorno
Vazão Máxima por Máquina	5100 m ³ /h
Redundância	Sim

Tabela 10.3. Características gerais do caso real.

Característica	Valor
Detalhes Físicos	
Área	33,60 m ²
Altura	3,00 m
Altura do Piso Elevado	0,34 m
Detalhes da Infraestrutura	
Número de ACUs	3
Número de PDUs	2
Número de Racks	13
Número de Equipamentos de TI	178
Número de Slots Vazios	108
Número de Slots Ocupados	409
Número de Placas Perfuradas	14
Dampers nas Placas Perfuradas	Não
Tamanho das Placas de Piso	600x600 mm
Área Perfurada das Placas	25%
Carga de TI de Projeto	44,00 kW
Carga de TI de Projeto Considerada *	66,00 kW
Carga de TI aplicada	37,60 kW
Carga das PDUs	11,98 kW
Densidade de Carga de Projeto	1310 W/m ²
Densidade de Carga de Projeto Considerada *	1965 W/m ²
Densidade de Carga Aplicada	1432 W/m ²
Detalhes do Sistema de Climatização	
Capacidade de Climatização Nominal (Sensível)	23,60 kW
Tipo de Insuflamento	Inferior
Tipo de Retorno	Superior
Posicionamento do Sensor de Temperatura	Retorno
Vazão Máxima por Máquina	5100 m ³ /h
Redundância	Não

* Carga de projeto considerada para a elaboração dos cálculos. Maiores explicações na Sessão 7.1.5.

Tabela 10.4. Lista de Equipamentos.

Rack	Fabricante	Modelo	Slot [U]	Tam. [U]	Desloc. [Pol]
G5	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
G5	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
G5	Trendnet	TK-803R	5	1	0,58
G5	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
G5	HP	Proliant DL980 G7	7	8	0,00
G5	IBM	eServer (FRU)	16	5	0,00
G5	Hp	vp15s	24	1	0,00
G5	Dell	poweredge r710	27	1	0,00
G5	Dell	poweredge r710	29	1	0,00
G5	IBM	x3650 M2	31	1	0,75
G5	Dell	poweredge r710	34	1	0,00
G5	Dell	poweredge r710	36	1	0,75
G6	Trendnet	TK-803R	5	1	0,00
G6	N/A	N/A	6	1	0,00
G6	Enterasys	RBT-8110	6	1	0,00
G6	Enterasys	CSK 125-48	8	1	0,00
G6	Cisco	7200 Series VXR	9	3	0,00
G6	Cisco	3800 Series	14	3	0,00
G6	N/A	N/A	18	1	0,00
G6	Tellabs	6325 Edge Node	19	1	0,00
G6	Rosenberger Domex	Dio Flex	21	1	0,00
G6	Hp	vp15s	23	1	0,00
G6	N/A	N/A	26	1	0,00
G6	Sonicwall	E5500	27	1	0,00
G6	Sonicwall	E5500	28	1	0,00
G6	Servidor Genérico	Servidor Genérico	30	1	0,00
G6	McAfee	WG-5500	31	2	0,00
G6	McAfee	EG-5000	33	1	0,00
G6	McAfee	WG-5500	34	2	0,00
G6	McAfee	WG-5500	36	2	0,00

G6	McAfee	EG-5000	37	1	0,00
G6	Source-Fire	Sensor VPN	39	1	0,00
G6	Source-Fire	Sensor INTERNET	40	1	0,00
G7	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
G7	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
G7	Trendnet	TK-803R	5	1	0,00
G7	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
G7	Hp	ProLiant DL 980 G7	7	8	0,00
G7	IBM	System x3650 M2	16	2	0,00
G7	IBM	System x3650 M2	18	2	0,00
G7	Hp	vp15s	22	1	0,00
G7	Sun Microsystems	SunFire x4450	24	2	0,00
G7	Sun Microsystems	SunFire x4450	26	2	0,00
G7	Servidor Genérico	Servidor Genérico	29	1	0,00
G7	Servidor Genérico	Servidor Genérico	30	1	0,00
G7	Dell	PowerEdge R710	32	2	0,00
G7	Dell	PowerEdge 2970	34	2	0,00
G7	Rital	CMC-TC	37	1	0,00
G7	Samsung	SVR-1660	39	1	0,00
G8	enterasys	c5g124-48p2	1	1	0,00
G8	Polycom	RMX 2000	2	2	0,00
G8	Polycom	RRS 2000	3	2	0,00
G8	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
G8	IBM	System x3650 M2	4	2	0,00
G8	Dell	PowerEdge R710	7	2	0,00
G8	IBM	System x3650 M2	9	2	0,00
G8	Dell	PowerEdge R710	11	2	0,00
G8	IBM	System x3650 M2	13	2	0,00
G8	Dell	PowerEdge R710	15	2	0,00
G8	Dell	PowerEdge R710	17	2	0,00
G8	hp	vp15s	20	1	0,00
G8	Trendnet	TK-803R	22	1	0,00
G8	IBM	System x3650 M2	24	2	0,00
G8	Sun Microsystems	SunFire x4450	27	2	0,00
G8	Dell	PowerEdge R710	29	2	0,00

G8	Sun Microsystems	SunFire x4450	31	2	0,00
G8	Dell	PowerEdge R710	37	2	0,00
G8	Dell	PowerEdge R710	39	2	0,00
G9	enferasys	C5G124-48p2	3	1	0,00
G9	Trendnet	TK-803R	5	1	0,00
G9	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
G9	Dell	PowerVault TL2000	6	2	0,00
G9	Dell	PowerVault TL2000	8	2	0,00
G9	Plycom	CMA 4000	10	1	0,00
G9	Dell	PowerEdge R710	12	2	0,00
G9	Dell	PowerEdge R710	14	2	0,00
G9	Dell	PowerEdge R710	16	2	0,00
G9	IBM	System x3650 M2	18	2	0,00
G9	Hp	vp15s	21	1	0,00
G9	Dell	PowerEdge R710	25	2	0,00
G9	Dell	PowerEdge R710	27	2	0,00
G9	Dell	PowerEdge R710	30	2	0,00
G9	Sun Microsystems	SunFire x4450	32	2	0,00
G9	Sun Microsystems	SunFire x4450	35	1	0,00
G9	Dell	PowerEdge R710	37	1	0,00
G10	Itautec	Small Desktop	0	1	0,00
G10	Trendnet	TK-803R	5	1	0,00
G10	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
G10	Dell	PowerEdge R710	8	2	0,00
G10	Dell	PowerEdge R710	11	2	0,00
G10	IBM	System x3650 M2	13	2	0,00
G10	IBM	System x3650 M2	15	2	0,00
G10	Dell	PowerEdge R710	17	2	0,00
G10	Hp	vp15s	22	1	0,00
G10	Dell	PowerEdge R710	24	2	0,00
G10	Dell	PowerEdge R710	26	2	0,00
G10	Sun Microsystems	SunFire x4450	31	2	0,00
G10	Sun Microsystems	SunFire x4450	33	2	0,00
G10	Dell	PowerEdge R710	38	2	0,00

Tabela 10.5. Especificações básicas do analisador de energia.

	Faixa de 40 A	Faixa de 400 A
Faixa mensurada:	0,5 A à 40 A	5 A à 400 A
Saída:	10 mV/A	1 mV/A
Acuracidade: 45 Hz à 3 kHz	2% + 0,015 A	2% + 0,04 A
Desvio de fase: 45 Hz à 400 Hz		
0,5 A à 1 A	Não especificado	NA
1 A à 5 A	4°	NA
5 A à 10 A	3°	Não especificado
10 A à 20 A	3°	2°
20 A à 40 A	2°	2°
40 A à 400 A	NA	1,5°
Fator de crista:	≤ 3	≤ 3 à 300 A $\leq 2,5$ à 400 A

Condições referenciais: 23 \pm 5°C, 20 à 75% RH; condutor concentrado na abertura do jaw; nenhum componente de DC; nenhum condutor adjacente.

ATabela 10.6. Especificações básicas do balômetro matricial.

Faixa de operação	
Diferencial de pressão:	±15 in. H ₂ O (3735 pa); 150 in. H ₂ O maximum safe operation pressure
Pressão absoluta:	15 to 40 in. Hg (356 to 1016 mmHg)
Velocidade:	25 to 15.500 ft/min (0,125 to 78 m/s) pitot probes; 25 to 5.000 ft/min (0,125 to 25 m/s) air flow probe; 25 to 2.500 ft/min (0,125 to 12,5 m/s) velocity matrix
Volume:	25 to 2.500 ft ³ /min (42 to 4.250 m ³ /h) capture hood
Temperatura:	40 to 140°F (4,4 to 60°C) base temperature probe; 14 to 140°F (-10 to 60°C) base temperature/RH probe; 40 to 140°F (4,4 to 60°C) operating (electronics)
Resolução	
Pressão:	0,00001 in. H ₂ O (0,001 pa) static and differential; 0,01 in. Hg (1 mmHg) absolute
Velocidade:	1 ft/min (0,01 m/s)
Volume:	1 ft ³ /min (1 m ³ /h)
Umidade Relativa:	0,1% RH
Temperatura:	0,1°F (0,1°C)
Acuracidade	
Pressão:	±2% of reading ±0,0001 in. H ₂ O (0,025 pa) static and differential; ±2% of reading absolute
Velocidade:	±3% of reading ±7 ft/min (0,04 m/s) >50 ft/min (>0,25 m/h)
Volume:	±3% of reading ±7 ft ³ /min (12 m ³ /s) >50 ft ³ /min (>85 m ³ /h)
Umidade Relativa:	±3% RH
Temperatura:	±0,5°F (0,3°C)

Tabela 10.7. Especificações básicas dos sensores de temperatura.

Detalhes
Digital Thermometer Measures Temperature in 0.5°C Increments
Accuracy $\pm 1^{\circ}\text{C}$ from -30°C to $+70^{\circ}\text{C}$ (See the Electrical Characteristics in the full data sheet for Accuracy Specification)
Built-In Real-Time Clock (RTC) and Timer Has Accuracy of ± 2 Minutes per Month from 0°C to $+45^{\circ}\text{C}$
Water Resistant or Waterproof if Placed Inside DS9107 iButton Capsule (Exceeds Water Resistant 3 ATM Requirements)
Automatically Wakes Up and Measures Temperature at User-Programmable Intervals from 1 Minute to 255 Minutes
Logs Consecutive Temperature Measurements in 2KB of Data-Log Memory
Records a Long-Term Temperature Histogram with 2.0°C Resolution
Programmable Temperature High and Temperature Low Alarm Trip Points
Records Up to 24 Timestamps and Durations When Temperature Leaves the Range Specified by the Trip Points
512 Bytes of General-Purpose Battery-Backed SRAM
Communicates to Host with a Single Digital Signal at 15.4kbps or 125kbps Using 1-Wire Protocol
Digital Identification and Information by Momentary Contact
Unique, Factory-Lasered, and Tested 64-Bit Registration Number (8-Bit Family Code +48-Bit Serial Number + 8-Bit CRC Tester) Assures Absolute Traceability Because No Two Parts are Alike
Multidrop Controller for 1-Wire Net
Chip-Based Data Carrier Compactly Stores Information
Data Can Be Accessed While Affixed to Object
Button Shape is Self-Aligning with Cup-Shaped Probes
Durable Stainless-Steel Case Engraved with Registration Number Withstands Harsh Environments
Easily Affixed with Self-Stick Adhesive Backing, Latched by Its Flange, or Locked with a Ring Pressed Onto Its Rim
Presence Detector Acknowledges When Reader First Applies Voltage

Tabela 10.8. Especificações básicas do termômetro.

Faixa de operação	
Temperatura:	-10°C a 50°C
Umidade relativa:	10% a 90%, sem condensação
Visor:	LCD a cores, 640 x 480, aproximadamente. 2 pol. X 3 pol. (na horizontal) com luz de fundo
Campo de visão:	23° x 17°
Resolução	
Temperatura:	$\leq 0,2^{\circ}\text{C}$ em 30°C
Faixa espectral do infravermelho:	7,5 μm a 14 μm
Acuracidade	
Temperatura:	$\pm 5^{\circ}\text{C}$ ou 5% (vale o mais alto)

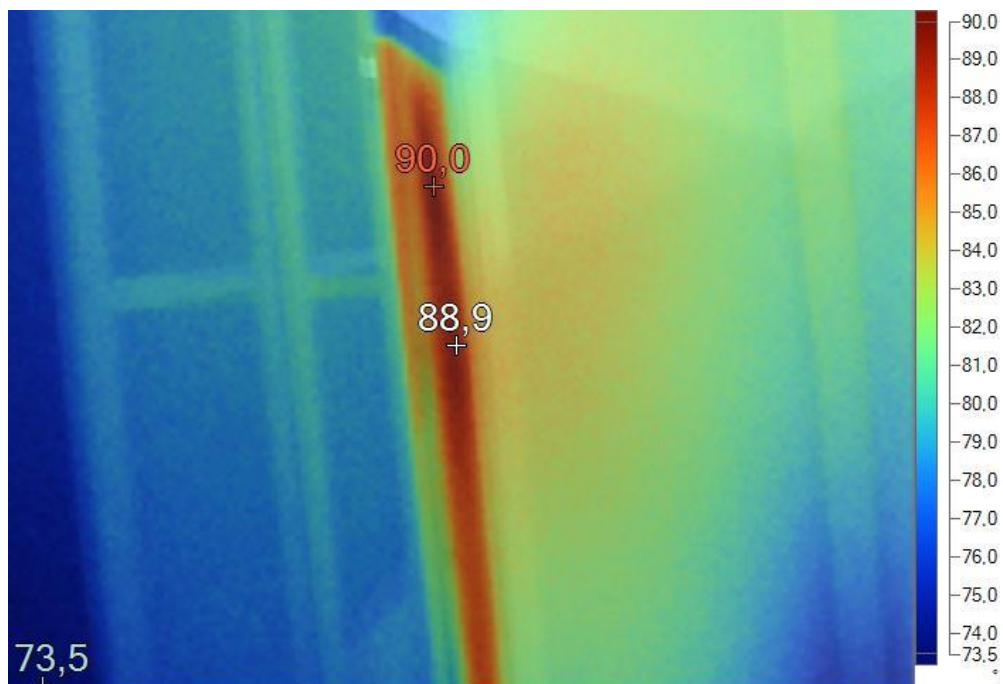


Figura 10.1. Imagem termográfica do ambiente real.

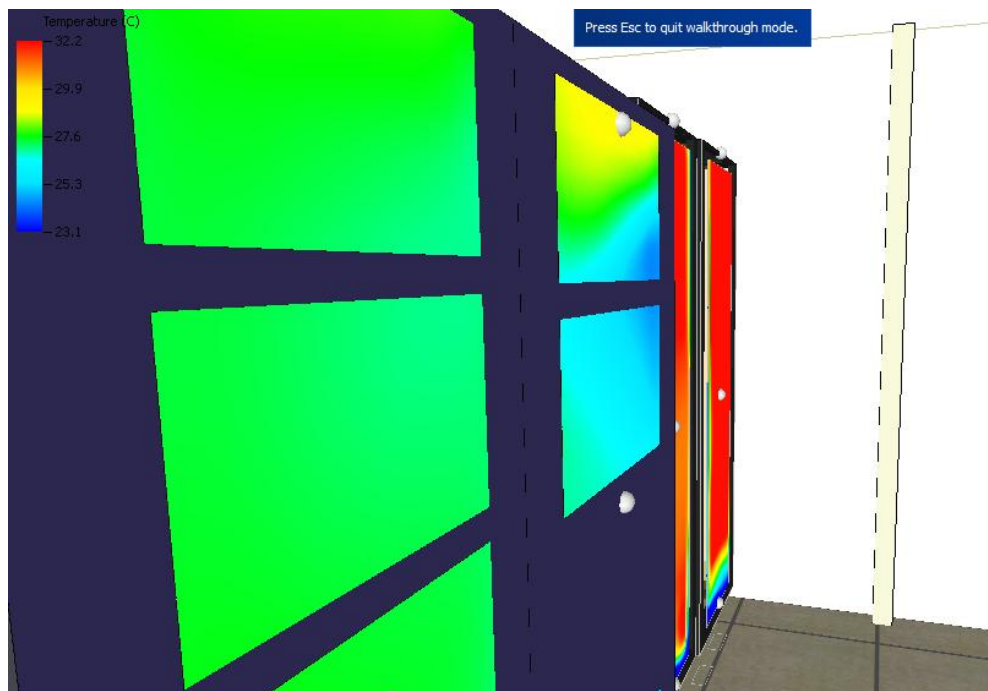


Figura 10.2. Imagem termográfica do ambiente simulado.

Tabela 10.9. Análise de energia dos quadros de distribuição.

Circuito	Quadro QDIX			Quadro QDIY			Rack
	A	B	C	A	B	C	
1	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	Desligado
2	0,00 A	4,74 A	0,00 A	0,00 A	4,74 A	0,00 A	G4
3	0,00 A	0,00 A	2,43 A	0,00 A	0,00 A	2,91 A	G5
4	1,33 A	0,00 A	0,00 A	2,90 A	0,00 A	0,00 A	G5
5	0,00 A	4,07 A	0,00 A	0,00 A	4,67 A	0,00 A	G6
6	0,00 A	0,00 A	2,23 A	0,00 A	0,00 A	1, 51	G6
7	6,26 A	0,00 A	0,00 A	5,52 A	0,00 A	0,00 A	G7
8	0,00 A	3,10 A	0,00 A	0,00 A	1,93 A	0,00 A	G7
9	0,00 A	0,00 A	5,23 A	0,00 A	0,00 A	8,39 A	G8
10	6,02 A	0,00 A	0,00 A	6,20 A	0,00 A	0,00 A	G8
11	0,00 A	3,63 A	0,00 A	0,00 A	3,52 A	0,00 A	G9
12	0,00 A	0,00 A	5,75 A	0,00 A	0,00 A	4,51 A	G9
13	3,67 A	0,00 A	0,00 A	4,13 A	0,00 A	0,00 A	G10
14	0,00 A	4,89 A	0,00 A	0,00 A	8,54 A	0,00 A	G10
15	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	Desligado
16	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	Desligado
17	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	Desligado
18	0,00 A	0,00 A	2,70 A	0,00 A	0,00 A	3,61 A	G9
19	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	Desligado
20	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	Desligado
21	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	Desligado
22	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	Desligado
23	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	Desligado
24	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	Desligado
25	5,67 A	5,53 A	4,92 A	5,51 A	5,35 A	4,83 A	B8
26	2,24 A	2,09 A	1,57 A	2,06 A	2,02 A	2,01 A	B7
27	5,03 A	5,14 A	4,62 A	5,77 A	5,76 A	5,72 A	B5
28	2,23 A	1,96 A	1,85 A	2,00 A	2,18 A	2,05 A	B4
29	3,37 A	3,55 A	0,00 A	3,64 A	3,62 A	0,00 A	G5
30	3,62 A	0,00 A	3,66 A	3,84 A	0,00 A	3,92 A	G7

31	0,00 A	8,16 A	8,17 A	0,00 A	8,08 A	8,22 A	B9
32	7,47 A	7,51 A	0,00 A	7,43 A	7,30 A	0,00 A	B10
33	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	Desligado
34	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	Desligado
35	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	Desligado
36	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	Desligado
37	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	Desligado
38	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	Desligado
39	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	Desligado
40	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	Desligado
41	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	Desligado
42	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	Desligado
43	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	Desligado
44	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	Desligado
45	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	Desligado
46	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A	Desligado

A seguir são apresentadas quatro plantas baixas que determinam as características físicas do ambiente de sala cofre do caso teste. Confeccionadas em AutoCAD®, as informações globais estão distribuídas em três plantas na seguinte forma:

PLANTA 01/04

- Layout dos racks;
- Disposição do cilindro de gás FM-200;
- Layout das ACUs e quadros de Distribuição.

PLANTA 02/04

- Layout das placas de piso;
- Dimensões dos dutos e posicionamento.

PLANTA 03/04

- Distribuição e posicionamento da calhas elétricas.

PLANTA 04/04

- Distribuição e posicionamento da calhas lógicas.